

Treball de Fi de Grau

Grau d'Enginyeria en Tecnologies Industrials

Posada en marxa d'un sistema de mesures en un túnel de cavitació

MEMÒRIA

Autor: Xavier Sánchez Botello
Director: Francesc Xavier Escaler Puigoriol
Codirector: David Bermejo Plana
Convocatòria: juny 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Actualment l'enginyeria mediambiental de tractament d'efluents industrials *Condorchem Envitech, S.L.* està realitzant un estudi científic per a cercar una font de calor alternativa per millorar la generació de calor en els evaporadors al buit. Per poder dur a terme aquest estudi científic, s'ha construït un túnel de cavitació a l'empresa, en el qual s'estudiarà si, forçant el fenomen de cavitació en el seu interior, es millora o no la generació de calor.

Degut a la necessitat d'extreure una gran varietat de dades en cada instant en el túnel de cavitació, és necessari implementar tot un sistema d'adquisició de dades. Aquest sistema d'adquisició de dades és l'encarregat d'extreure les magnituds físiques (pressió, temperatura,...) de determinats punts del túnel de cavitació i mostrar-les en temps real en una interfície gràfica a l'usuari. Tanmateix, el sistema d'adquisició de dades també és capaç d'emmagatzemar, en tot moment, en un fitxer extern, les dades extretes, per a un posterior tractament d'aquestes.

Aquest treball engloba tot el procés de selecció, disseny i implementació del sistema d'adquisició de dades, des de l'elecció correcta dels sensors fins a la programació i instal·lació d'aquests. També és important distingir els diferents tipus d'errors existents en cada mesura i tenir-los en compte a l'hora de mostrar el valor actual de cada variable.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	2
1. GLOSSARI	5
1.1. Nomenclatura.....	7
1.2. Abreviatures.....	8
2. INTRODUCCIÓ	10
2.1. Objectius del projecte	10
2.2. Abast del projecte	11
3. TÚNEL DE CAVITACIÓ	13
3.1. Variables primàries	15
3.2. Variables derivades	16
4. SISTEMA D'ADQUISICIÓ DE DADES	19
4.1. Sensors.....	19
4.1.1. Sensor de Pressió.....	19
4.1.1.1. Funcionament del sensor de pressió.....	20
4.1.1.2. Comportament dinàmic.....	21
4.1.2. Sensor de temperatura	22
4.1.2.1. Funcionament del sensor de temperatura.....	22
4.1.2.2. Comportament dinàmic del sensor.....	23
4.1.3. Cabalímetre	23

4.1.3.1. Funcionament del cabalímetre	24
4.1.4. Variador de freqüència	24
4.1.4.1. Funcionament del variador de freqüència	24
4.1.4.2. Condicionament del variador de freqüència	26
4.2. Característiques dels sistemes de mesura	28
4.2.1. Rang de mesura	28
4.2.2. Precisió o exactitud	28
4.2.3. Característica estàtica i sensibilitat	29
4.2.4. Resolució i rang dinàmic	29
4.2.5. Fidelitat, repetibilitat i reproductibilitat	30
4.2.6. Característiques dels sensors utilitzats	31
5. CADENA DE MESURES	32
5.1. Mòdul NI-9208	32
5.1.1. Connexió dels sensors al mòdul NI-9208	33
5.1.2. Connexió elèctrica del sensor de pressió PMC-21:	34
5.1.3. Connexió elèctrica del sensor de temperatura TR11-C	34
5.1.4. Connexió elèctrica del cabalímetre FEP311	35
5.1.5. Connexió elèctrica del variador de freqüència	36
5.2. Font d'alimentació NIPS-16	37
5.3. Xassís CompactDAQ NI-9185	38
5.4. Posada en marxa	39
6. ESTUDI D'ERRORS I INCERTESA	41
6.1. Incertesa de les mesures primàries	41

6.2. Incertesa de les variables derivades.....	44
6.3. Xifres significatives d'una mesura.....	48
7. INTERFÍCIE GRÀFICA LABVIEW	50
8. VALIDACIÓ DEL SISTEMA D'ADQUISICIÓ	58
9. PLANIFICACIÓ TEMPORAL	62
10. IMPACTE MEDIAMBIENTAL	63
11. PRESSUPOST	65
CONCLUSIONS	68
AGRAÏMENTS	70
BIBLIOGRAFIA	71
Referències bibliogràfiques	71
Bibliografia complementària	73
ANNEX1. CÀLCUL DE LA INCERTESA SISTEMÀTICA PER CADA SENSOR UTILITZAT	74

1. Glossari

Array 2D:	Tipus d'estructura de dades que agrupa elements del mateix tipus en una quadrícula. Es pot entendre com una matriu de dades, formada per files i columnes.
Clúster:	Tipus d'estructura de dades que agrupa dades de diferents tipus.
Dades dinàmiques:	Tipus d'estructura de dades típica de LabVIEW que inclou informació del nom del senyal i la data i hora en què s'ha obtingut.
Error de compensació:	Diferència sistemàtica entre el valor de corrent de sortida i el valor de sortida ideal.
Error de guany:	Desviació en el pendent de la recta de sortida respecte a la ideal. Normalment és causat per les imperfeccions dels amplificadors, tals com toleràncies del resistor o les característiques del convertidor analògic-digital.
Express VI:	Tipus d'instrument virtual de LabVIEW que es configura amb un quadre de diàleg i requereix d'un cablejat mínim.
IGBT:	Dispositiu actiu amb tres terminals, anomenats drenador D, sortidor S i porta G, que només s'utilitza com a dispositiu commutador en els sistemes electrònics de potència i que es controla per tensió.
Incertesa:	La incertesa d'una mesura és un paràmetre que caracteritza la dispersió dels valors atribuïts a una quantitat mesurada. La incertesa reflecteix el coneixement incomplet de la quantitat. Totes les mesures estan subjectes a una incertesa i un valor mesurat només és complet si està acompanyat per una incertesa associada.
Incertesa aleatòria:	Incertesa associada a la no-repetibilitat de mesures consecutives quan totes les condicions de mesura són les mateixes. Aquesta incertesa té una base probabilística i es pot calcular fent servir una distribució normal si és té un nombre elevat de mostres.

Incertesa sistemàtica:	Incertesa constant per cada aparell deguda al calibratge dels instruments de mesura, la seva resolució,... Aquesta incertesa pot ser corregida amb un recalibratge dels instruments.
<i>Input Noise:</i>	Paràmetre anglès que es refereix al soroll del sistema, mesurat en valor eficaç de corrent. El genera el sistema electrònic per ell mateix i és degut a les fluctuacions del voltatge de l'alimentació.
LabVIEW:	Plataforma de disseny de sistemes i entorn de desenvolupament per a un llenguatge de programació visual, creat per National Instruments.
Multiplexor:	Un multiplexor consisteix en una bateria d'interruptors, un entre cada entrada i la sortida del multiplexor, l'estat dels quals es controla amb el conjunt de senyals digitals subministrades per un descodificador digital.
Nivell de significació:	Valor llinar que indica si el resultat d'un estudi es pot considerar estadísticament significatiu. En un interval de confiança del 95% el nivell de significació és $\alpha = 0,05$.
P&ID:	Diagrama detallat del procés industrial on es mostra el flux del procés en les canonades i dipòsits, juntament amb els equips instal·lats i l'instrumental de control.
Protocol HART:	Protocol híbrid d'automatització industrial analògic/digital que permet comunicar una sola variable fent servir un senyal analògic de 4 a 20 mA mentre comunica també informació agregada sobre un senyal digital.
PWM:	Tècnica de modulació d'amplada de polsos, que consisteix en controlar el valor de tensió mitjançant un senyal quadrat que commuta a una freqüència determinada.
Sensor:	És un dispositiu que proporciona una sortida proporcional a l'entrada, la qual és el paràmetre físic que es vol mesurar.
Transductor:	Dispositiu que converteix un senyal d'un tipus físic en un altre senyal d'un tipus físic diferent. Habitualment converteixen un tipus d'energia (mecànica, tèrmica,...) en un altre tipus d'energia.

Transmissor: Tipus de transductor que capta la variable mesurada mitjançant un element sensible i la converteix en un senyal de transmissió estàndard de 4 a 20 mA, que és funció exclusiva de la variable mesurada.

1.1. Nomenclatura

A_{in} :	Secció d'entrada al venturi [m^2].
A, A', A'' :	Constants.
B, B', B'' :	Constants.
C, C', C'' :	Constants.
C_p :	Calor específica del fluid [$kJ/kg \cdot K$].
$N_{hidràulica}$:	Potència hidràulica [W].
P :	Pressió del fluid [kPa].
P_{in} :	Pressió d'entrada al venturi [kPa].
P_{sat} :	Pressió de Saturació [kPa].
\dot{q} :	Potència calorífica [W].
Q :	Cabal del fluid [m^3/h].
s :	Desviació estàndard d'un cert nombre de mesures.
T :	Temperatura del fluid [K] o [$^{\circ}C$].
v_{in} :	Velocitat d'entrada al venturi [m/s].
\bar{x} :	Valor mitjà d'un cert nombre de mesures [unitat física].
α :	Nivell de significació.
δU :	Incertesa d'una mesura [unitat física].
δU_{ADC} :	Incertesa total del convertidor analògic-digital [unitat física].

δU_{LSB} :	Error degut al manteniment del senyal analògic mostrejat amb un nombre determinat de bits [mA/bit].
δU_{gain} :	Error de guany [unitat física].
δU_{offset} :	Error de compensació [unitat física].
δU_{random} :	Incertesa aleatòria [unitat física].
$\delta U_{sistemàtica}$:	Incertesa sistemàtica [unitat física].
ρ :	Densitat del fluid [kg/m ³].
σ :	Nombre de cavitació, adimensional.

1.2. Abreviatures

ADC:	Convertidor analògic-digital (A/D).
IGBT:	Acrònim de l'anglès ' <i>Isolated Gate Bipolar Transistor</i> '.
LabVIEW:	Acrònim de l'anglès ' <i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i> '.
LRL:	Acrònim de l'anglès ' <i>Lower Range Limit</i> ', corresponent al valor mínim que un sensor pot mesurar.
LSB:	Acrònim de l'anglès ' <i>Least Significant Bit</i> ', corresponent al bit menys significatiu, situat el més a la dreta.
P&ID:	Acrònim de l'anglès ' <i>Piping and Instrumentation Diagram</i> '.
Protocol HART:	Acrònim de l'anglès ' <i>Highway Addressable Remote Transducer</i> '.
PWM:	Acrònim de l'anglès ' <i>Pulse Width Modulation</i> '.
RSS:	Acrònim de l'anglès ' <i>Root Sum Squared</i> ', que és l'arrel de la suma de quadrats.
SI:	Sigles de <i>Sistema Internacional</i> , sistema d'unitats internacional creat per homogeneïtzar les unitats utilitzades en diferents països.

- URL:** Acrònim de l'anglès '*Upper Range Límit*', corresponent al valor màxim que un sensor pot mesurar.
- VFD:** Variador de freqüència.
- VI:** Acrònim de l'anglès '*Virtual Instrument*'. Es refereix al nom que reben els programes de LabVIEW, anomenats instruments virtuals.

2. Introducció

La disponibilitat d'aigua està començant a ser una inquietud del món globalitzat, tant per als països desenvolupats com pels països en vies de desenvolupament. Un ús sostenible dels recursos d'aigua pot derivar en la recerca de fonts d'aigua o en la reutilització de l'aigua residual que es desprèn d'efluents industrials (líquids bruts).

L'empresa *Condorchem Envitech, S.L.* està cercant una font de calor alternativa per tal de poder dur a terme el procés de tractament d'aquestes aigües mitjançant una de les tècniques més eficaces per a la minimització i el tractament d'aigües residuals industrials: l'evaporació al buit. Aquests evaporadors al buit transformen l'aigua residual en dos corrents, un concentrat d'aigua residual (producte de rebuig) i un altre d'aigua d'alta qualitat. Al fer treballar els evaporadors en condicions de buit s'aconsegueix una reducció de la temperatura d'ebullició de l'efluent de líquid, cosa que comporta un estalvi energètic i un augment de l'eficiència en el procés. [1]

Per tal de dur a terme aquest procés d'evaporació, és necessària l'aportació d'energia en forma de calor. És per això que *Condorchem* està cercant una font de calor alternativa basada en generadors de calor hidrodinàmics. En concret es vol construir un túnel de cavitació per estudiar si el fenomen de la cavitació pot millorar l'escalfament d'aigua.

Donat que l'objectiu del túnel de cavitació és mesurar la generació de calor en funció de determinades condicions de funcionament, és necessari instal·lar un sistema d'adquisició de dades que sigui capaç de mostrar, en tot moment, aquestes condicions i enregistrar-les en un document per poder fer càlculs posteriorment.

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest treball consisteix en dissenyar i posar en funcionament un sistema d'adquisició de dades per un túnel de cavitació, per tal de poder extreure totes les dades rellevants i fer un posterior estudi per discernir si la cavitació afecta l'escalfament de l'aigua en un sistema de bombeig tancat.

Per poder assolir aquest objectiu és necessari especificar els objectius particulars que permeten assolir-lo:

- Definir les variables d'interès que es volen extreure del túnel de cavitació.
- Definir quines variables derivades es volen calcular.
- Estudiar tots els elements presents a la cadena de mesura.
- Calcular la incertesa que té associada cada mesura extreta.

- Programar la interfície gràfica per poder mostrar i enregistrar dades.
- Comprovar el funcionament del sistema d'adquisició de dades al túnel de cavitació.
- Fer proves on s'enregistrin totes les dades rellevants i verificar que són correctes.

2.2. Abast del projecte

El sistema d'adquisició de dades es farà exclusivament per ser instal·lat en un túnel de cavitació i servirà per a captar dades per realitzar un estudi científic posterior, el qual no està dins l'abast del projecte.

El projecte inclourà tot l'estudi experimental i de muntatge del sistema de mesures, des de l'elecció del sensor corresponent fins a la programació d'aquest i el seu muntatge. Finalment també es faran proves i es validarà el seu funcionament.

3. Túnel de cavitació

Un túnel de cavitació és un circuit hidràulic tancat en el qual, mitjançant la variació de les condicions de treball, es vol forçar el fenomen de la cavitació. Aquest fenomen consisteix en la formació de bombolles de vapor en el líquid, com a conseqüència d'una disminució de la pressió per sota de la pressió de vapor del líquid.

El túnel de cavitació que s'ha construït a l'empresa de tractament d'aigües residuals *Condorchem Envitech S.L.* està format per un sistema de transport d'aigua pel que es fa circular aigua impulsada per una bomba centrífuga, connectada a un motor trifàsic de gàbia d'esquirol de 3 kW de potència, amb una velocitat de rotació nominal de 2850 rpm (regulable mitjançant un variador de freqüència). En aquest circuit hidràulic tancat s'hi situen dos dipòsits, un al costat d'aspiració de la bomba i l'altre al costat d'impulsió. Addicionalment, es situen vàlvules en determinats punts del túnel per tal de poder regular el cabal i controlar el punt de treball de la bomba centrífuga.

Finalment, s'hi afegirà un venturi de secció rectangular per generar i observar el fenomen de cavitació. L'esquema del túnel de cavitació es mostra a la Figura 3.1 i el túnel de cavitació construït a l'empresa a la Figura 3.2.

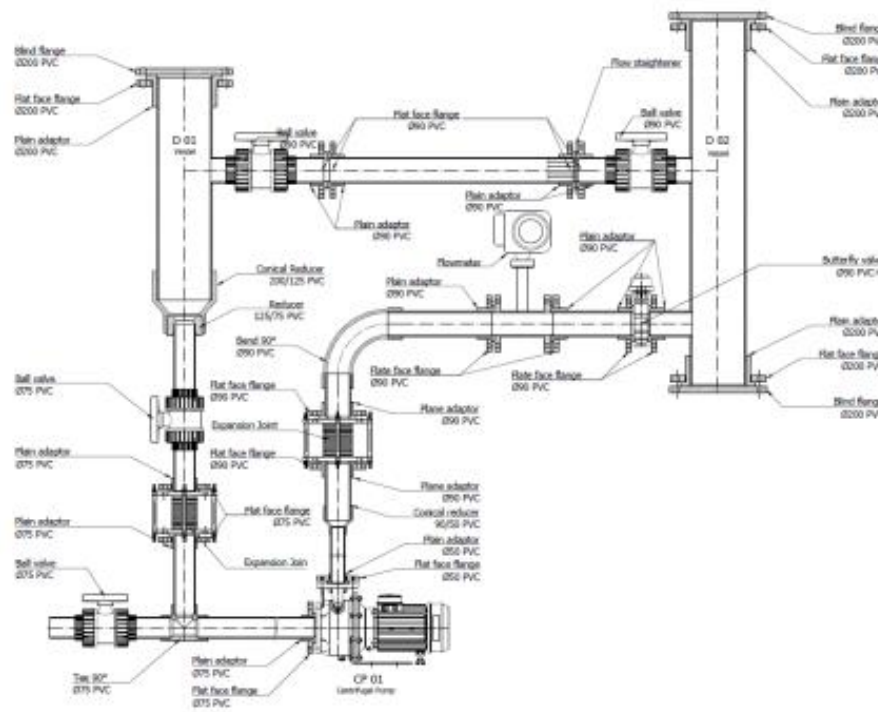


Figura 3.1. Esquema del túnel de cavitació on s'implementa el sistema d'adquisició de dades.



Figura 3.2. Túnel de cavitació construït a l'empresa.

Com es pot observar a la Figura 3.2, les canonades utilitzades són de PVC i de diferents diàmetres nominals, els diàmetres i espessors de paret estan normalitzat segons la norma UNE-EN ISO 1452 “Sistemes de canalització en materials plàstics per a la conducció d’aigua i pel sanejament enterrat o aeri amb pressió”.

L’objectiu de l’estudi científic és quantificar la calor generada per cada experiment en aquest túnel de cavitació: amb i sense cavitació, sota les mateixes condicions de treball.

La calor generada es mesurarà indirectament amb el rati d’augment de temperatura respecte el temps. La cavitació es pot caracteritzar mitjançant el nombre adimensional de cavitació. Per aquesta raó les variables principals que s’han de controlar són el cabal, les pressions i la presència de cavitació a la secció del venturi, entre d’altres.

És important diferenciar clarament el tipus de variables que s’obtenen directament dels sensors i aquelles que s’han de calcular a partir d’aquestes mesures. D’aquesta manera, s’anomenen variables primàries aquelles que es mesuren directament amb els sensors. Les variables derivades, en canvi, són totes aquelles que provenen d’una combinació de les originals, com per exemple el nombre de cavitació o la potència tèrmica.

3.1. Variables primàries

Les variables primàries que el sistema d'adquisició mesura són:

- La pressió absoluta del dipòsit situat a la zona d'aspiració de la bomba, mesurada en kPa amb el sensor que anomenarem "PT100".
- La temperatura del sistema, considerada com la temperatura del dipòsit situat a la zona d'aspiració de la bomba, mesurada en ° C amb el sensor "TT100".
- La diferència de pressions entre l'entrada i la sortida de la bomba, mesurada en kPa amb el sensor a l'entrada de la bomba "PT400" i el sensor a la sortida "PT401".
- La velocitat de rotació de la bomba "CP400", que és controlada amb el variador de freqüència i s'obté en rpm.
- El cabal a la sortida de la bomba, mesurat en m³/h amb el cabalímetre "FIT400".
- La pressió absoluta del dipòsit situat a la zona d'impulsió de la bomba, mesurada en kPa amb el sensor que anomenarem "PT200".
- La temperatura del dipòsit situat a la zona d'impulsió de la bomba, mesurada en ° C amb el sensor "TT200".
- La pressió absoluta a l'entrada del venturi, mesurada en kPa amb el sensor "PT302".
- La pressió absoluta a la secció mínima del venturi, mesurada en kPa amb el sensor "PT301".
- La pressió absoluta a la sortida del venturi, mesurada en kPa amb el sensor "PT300".

A la Figura 3.3 s'observa la ubicació d'aquests sensors en un esquema del túnel de cavitació.

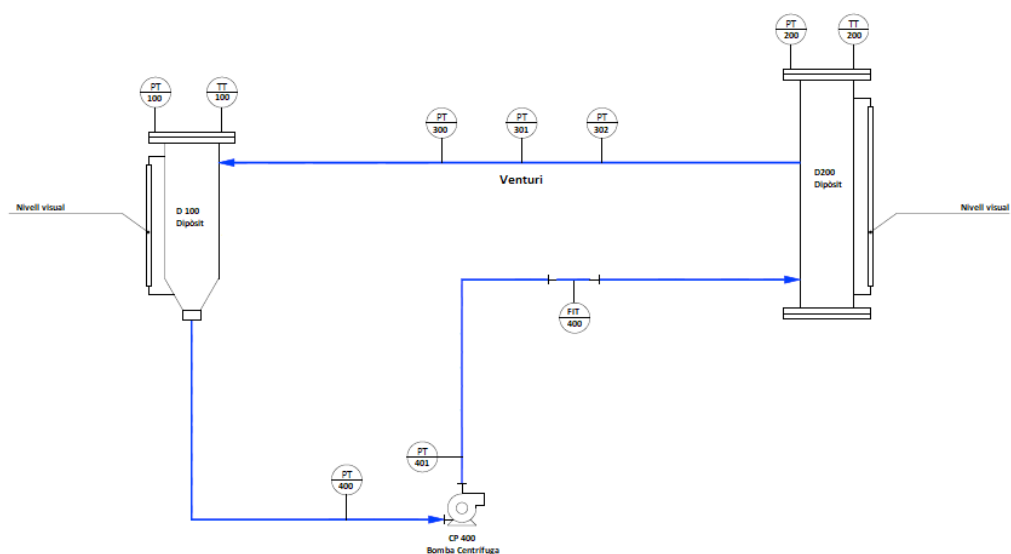


Figura 3.3. P&ID del túnel de cavitació on es mostra la distribució de sensors.

3.2. Variables derivades

Les variables derivades que es volen obtenir a partir de les primàries i que es requereixen per dur a terme l'estudi són:

- La **densitat** del fluid, expressada en kg/m³ i calculada amb l'equació 105 de l'institut del disseny per a la recerca de propietats físiques (DIPPR105):

$$\rho(T) = \frac{A}{B^{1+(1-\frac{T}{C})^D}} \quad (3.1)$$

on T és la temperatura de l'aigua en K i A , B , C i D són les constants:

$$A = 0,14395$$

$$B = 0,0112$$

$$C = 649,727$$

$$D = 0,05107$$

- La **pressió de saturació**, expressada en kPa i corresponent a la pressió a la que l'aigua comença a evaporar-se a una temperatura determinada. La pressió de saturació és calculada amb l'equació de Buck:

$$P_{sat}(T) = A' \cdot e^{[(B' - \frac{T}{C'}) \cdot (\frac{T}{D' + T})]} \quad (3.2)$$

on T és la temperatura en °C i A' , B' , C' i D' són les constants:

$$A' = 0,61121$$

$$B' = 18,678$$

$$C' = 234,5$$

$$D' = 257,14$$

- La **velocitat** d'entrada al venturi, expressada en m/s i calculada segons:

$$\bar{v}_{in} = \frac{Q}{A_{in}} \quad (3.3)$$

on Q és el cabal mesurat en m³/s i A_{in} és la secció d'entrada al venturi (0,072x0,072 m²)

- El **nombre de cavitació o Sigma**, nombre adimensional que indica la intensitat de la cavitació, comparant la pressió estàtica amb la pressió dinàmica. Es calcula utilitzant

l'expressió següent:

$$\sigma(Q, T, P_{in}) = \frac{P_{in} - P_{sat}(T)}{\frac{1}{2} \cdot \rho(T) \cdot v_{in}^2(Q)} \quad (3.4)$$

on P_{in} és la pressió absoluta a l'entrada del Venturi (sensor PT302) mesurada en Pa, P_{sat} és la pressió de saturació a la temperatura del circuit mesurada en Pa, ρ és la densitat a la temperatura del circuit mesurada en kg/m³ i v_{in} és la velocitat mitjana a l'entrada del Venturi mesurada en m/s.

- El **pendent de la temperatura** a la gràfica de l'evolució de la temperatura al llarg del temps. Es calcula fent una regressió lineal i es mesura en K/s
- La **velocitat a la entrada i a la sortida de la bomba**, calculada amb l'equació (3.3), però tenint en compte que a la zona de succió de la bomba (entrada) el diàmetre nominal és de 0,075 m, amb un espessor de 0,0036 m; mentre que a la zona d'impulsió de la bomba (sortida) el diàmetre nominal és de 0,05 m, amb un espessor de 0,0024 m. Per tant, l'àrea de la zona de succió és $3,6103 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ i la de la zona d'impulsió és $1,6046 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$.
- La **potència hidràulica** generada a la bomba, la qual es mesura en W i es calcula de la següent manera:

$$N_{hidràulica}(Q, T, P) = Q \cdot \left[\Delta P + \rho(T) \cdot g \cdot \left(\Delta h + \frac{v_2^2(Q) - v_1^2(Q)}{2g} \right) \right] \quad (3.5)$$

on $N_{hidràulica}$ és la potència hidràulica mesurada en W, Q és el cabal mesurat en m³/s, ΔP és la diferència de pressions produïda a la bomba mesurada en Pa, Δh és l'alçada entre el sensor de pressió a la entrada i a la sortida de la bomba (0,28 m) i v_1 i v_2 són les velocitats a la entrada i a la sortida de la bomba, respectivament, mesurades en m/s.

- La **calor específica** mitjana, la qual es calcula amb l'equació de NIST (Chase 1998):

$$C_p = A'' + \frac{B''T}{10^3} + \frac{C''T^2}{10^6} + \frac{D''T^3}{10^9} + \frac{E'' \cdot 10^6}{T^2} \quad (3.6)$$

on C_p és la calor específica de l'aigua en kJ/kg·K, T és la temperatura del primer dipòsit en K i A'' , B'' , C'' , D'' , E'' són els coeficients:

$$A'' = -11,30185$$

$$B'' = 84,5554$$

$$C'' = -117,4279$$

$$D'' = 137,3531$$

$$E'' = 0,214003$$

- La **potència calorífica**, que és l'energia per unitat de temps que és utilitzada per augmentar la temperatura del líquid, mesurada en W. Es calcula mitjançant l'equació:

$$\dot{q} = m \cdot C_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3.7)$$

on \dot{q} és la potència calorífica mesurada en W, m és la massa d'aigua en el sistema en kg (aproximadament en el túnel hi ha uns 80 litres de aigua, que corresponen a uns 80 kg d'aigua), C_p és la calor específica de l'aigua a la temperatura mitjana en J/kg·K i $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ és el pendent de la temperatura, mesurat en K/s.

4. Sistema d'adquisició de dades

El sistema d'adquisició de dades és l'encarregat de captar els senyals físics del túnel, subministrar-los en un format adient al mòdul que els ha de processar, enregistrar-los i fer un posterior tractament de les dades extretes.

El procés de captar els senyals físics i subministrar-los al mòdul de processament comprèn dues etapes:

1. L'etapa de transducció, integrada pels sensors que converteixen les magnituds físiques (pressió, temperatura, cabal) presents en el món real a un altra magnitud física diferent (capacitat elèctrica, resistència elèctrica, camp elèctric).
2. L'etapa d'acondicionament, integrada pels blocs que adapten aquesta segona magnitud física provinent dels sensors, en un senyal analògic de corrent comprès entre 4 i 20 mA. Donat que el processament és digital i es capten senyals analògics, es fa imprescindible convertir a discrets aquests senyals (conversió analògica-digital).

4.1. Sensors

Per tal de dur a terme les mesures de les magnituds físiques corresponents (pressió, temperatura, cabal i freqüència) es farà ús de diferents tipus de transductors que transformin aquestes magnituds en senyals elèctrics per quantificar-les. En concret es fan servir transmissors, que són un tipus de transductors que transformen el valor mesurat en un senyal estandarditzat de corrent de 4 a 20 mA.

Els transmissors utilitzats en el projecte són: 7 sensors de pressió absoluta subministrats per Endress&Hauser, 2 sensors de temperatura Pt100 Classe A subministrats per WIKA, 1 cabalímetre subministrat per ABB i un variador de freqüència subministrat per DANFOSS.

4.1.1. Sensor de Pressió

Per mesurar la pressió es fa servir un transmissor de pressió absoluta del tipus Cerabar PMC-21, fabricat per Endress&Hauser.

En tot el túnel de cavitació es fa servir el model MC053X01169, que té un rang de mesura de 0 a 600 kPa. Tot i així, donat que en el punt de secció mínima del venturi s'esperen pressions baixes i ens interessa tenir més precisió en la mesura, es fa servir un model diferent: el MB044B01169, que té un rang de mesura de 0 a 200 kPa [2]. Aquest sensor s'introdueix a la canonada fent un petit forat en aquesta i passant un tub de secció petita fins

al col·lector de força del sensor, com es veu a la Figura 4.1.

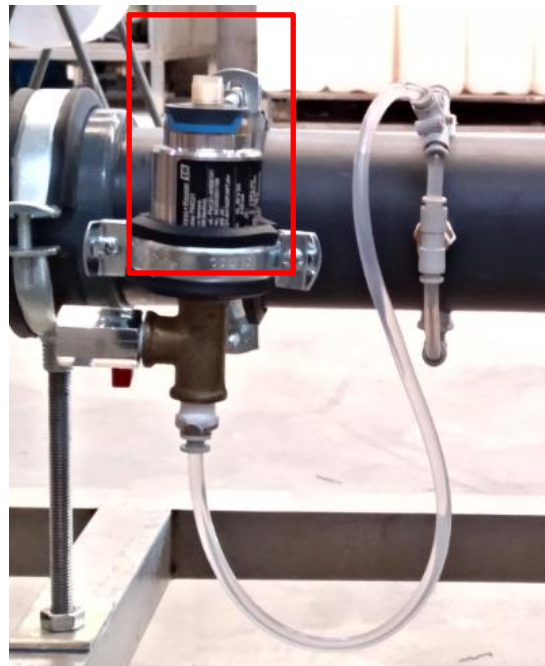


Figura 4.1. Situació del sensor de pressió PT400 aigües amunt de la bomba centrífuga del túnel de cavitació.

4.1.1.1. Funcionament del sensor de pressió

Els sensors de pressió utilitzen un col·lector de força (com un diafragma o un pistó) per mesurar la tensió (o flexió) provocada per la força aplicada sobre un àrea.

En concret, el sensor està format per una membrana separadora ceràmica (anomenada PMC-21), en la qual la pressió de procés actua directament sobre aquesta i la flexiona, sense necessitat d'oli. Aquesta flexió provoca un canvi en la capacítància d'aquesta, la qual és funció de la pressió exercida entre la base i la membrana ceràmica, com s'esquematitza a la Figura 4.2.

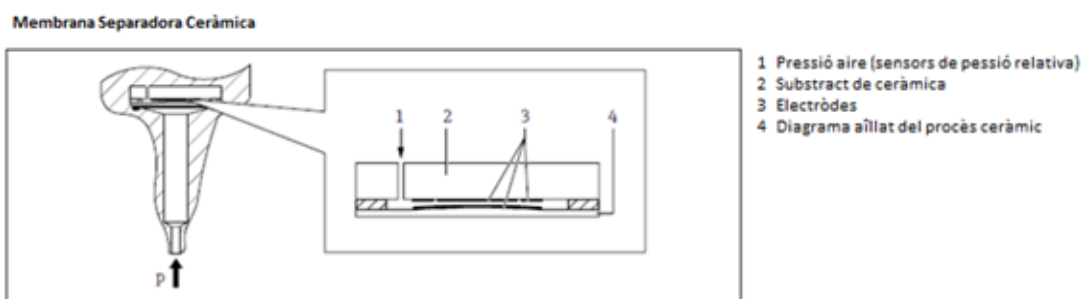


Figura 4.2. Esquema del funcionament del sensor de pressió amb membrana separadora ceràmica. Imatge extreta de la fulla d'especificacions tècniques del sensor PMC-21.[2]

Per garantir el correcte funcionament del sensor PMC-21, el fabricant recomana treballar entre -25 i 100° C. Pel que fa a la pressió màxima de treball, el fabricant indica que, en cap cas, el sensor pot estar per sobre de 4 MPa (valor anomenat OPL, de l'anglès "Over Pressure Limit"), valor que no s'assolirà en cap cas en el túnel de cavitació.

Degut a la tècnica utilitzada, s'ha de tenir en compte l'orientació d'aquest sensor què, en el cas de col·locar-lo vertical, el pes de la pròpia membrana pot induir un petit error en la mesura. Per tal de corregir-lo, donat que l'afectació del pes de la membrana és constant, només cal afegir o treure una petita quantitat a la mesura final (correspondria a una correcció de l'error de compensació d'uns $\pm 0,3$ kPa).

4.1.1.2. Comportament dinàmic

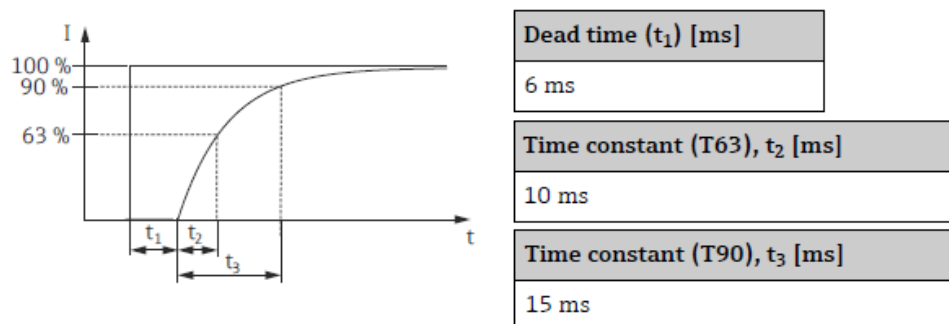


Figura 4.3. Comportament dinàmic del sensor segons el fabricant. Imatge extreta de la fulla d'especificacions tècniques del sensor PMC-21. [2]

Pel que fa al comportament dinàmic del sensor, segons els fabricant té un temps mort d'uns 6 ms. Aquest temps es refereix al període de temps durant el qual si hi ha un canvi en la pressió (es considera que aquest canvi és un senyal graó, com el que es veu a la Figura 4.3) no es produeix cap tipus d'efecte en el corrent de sortida fins transcorregut aquest temps mort de 6 ms.

Per l'estudi del seu comportament dinàmic, també és d'interès conèixer la seva constant de temps τ , la qual correspon al temps necessari que ha de transcórrer perquè el sistema arribi al 63% del seu valor final, quan es produeix un canvi en la pressió d'entrada. Pel sensor de pressió PMC-21 aquest temps és de 10 ms.

Finalment, es pot considerar que el sistema ha captat el 90% d'un canvi en la pressió passats 15 ms. Amb aquesta informació, es calcula que la freqüència màxima de mesura del sensor és de 66,66 Hz.

Cal tenir en compte que el temps d'encesa és inferior a 2 segons. Tot i així, es recomana deixar passar aquests 2 segons a l'inici, per tal que el senyal s'estabilitzi.

4.1.2. Sensor de temperatura

Per mesurar la temperatura es fa servir el sensor de temperatura del tipus TR11-C, subministrat per WIKA. Aquest tipus de sensor porta incorporat una termoresistència de pel·lícula prima i un transmissor del tipus T15.H en el capçal, per enviar un senyal analògic de 4 a 20 mA.

Els sensors de temperatura amb termoresistències són ideals per fer-los servir en medis líquids i gasos sota càrregues mecàniques i certes condicions químiques. A més a més, estan dissenyats per ser introduïts al procés enroscant-los directament en dipòsits i canonades. A la Figura 4.4 s'observa que s'ha introduït el sensor de temperatura TT200 enroscant-lo directament a la part inferior del dipòsit D200.



Figura 4.4. Col·locació del sensor de temperatura TT200 al túnel de cavitació.

4.1.2.1. Funcionament del sensor de temperatura

Una termoresistència és un detector de temperatura resistiu, és a dir, un sensor de temperatura que detecta la variació de la resistència d'un determinat conductor en funció de la temperatura ambient. La resistència, anomenada resistència de pel·lícula prima, està formada per una capa prima de platí sobre una placa de suport ceràmica i revestida per una capa addicional de vidre, com es veu a la Figura 4.5. [3]

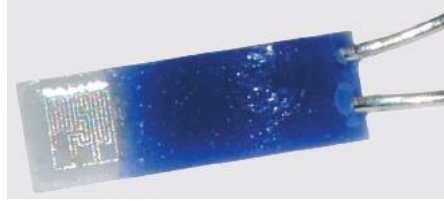


Figura 4.5. Termoresistència de pel·lícula prima.

Aquesta resistència presenta un coeficient de temperatura de resistència positiu, el que significa que augmenta la seva impedància a mesura que augmenta la temperatura. [4]

4.1.2.2. Comportament dinàmic del sensor

El model T15 és un transmissor de temperatura amb 3 cables que, segons el fabricant, necessita com a màxim 4 minuts després de la primera encesa per tal de començar a mesurar valors fiables de temperatura. Pel tipus d'element sensible, la freqüència de mostreig recomanable és de 5 Hz. Té un temps de resposta inferior a 0,6 segons. [5]

4.1.3. Cabalímetre

Per tal de fer la transducció del cabal, s'utilitza el cabalímetre electromagnètic FEP311, subministrat per ABB, el qual detecta el cabal utilitzant la llei d'inducció de Faraday. Aquesta llei indica que el voltatge al llarg de qualsevol conductor que es mogui per un camp magnètic és proporcional a la velocitat d'aquest conductor. Per tant, per poder aplicar aquest principi al cabalímetre electromagnètic, és necessari que el fluid sigui conductor elèctric.

A la Figura 4.6 es mostra el cabalímetre FIT400 muntat en el túnel de cavitació. És important col·locar-lo en el sentit correcte de la direcció del flux, el qual està indicat a la part frontal del cabalímetre.



Figura 4.6. Col·locació del cabalímetre FIT400.

4.1.3.1. Funcionament del cabalímetre

Dins del transductor hi ha una bobina que genera un camp magnètic que, mitjançant el moviment del líquid conductor elèctric, genera una força electromotriu que és captada pels elèctrodes situats dins el sensor. Aquesta força electromotriu captada (voltatge), com s'esquematitza a la Figura 4.7, és proporcional a la velocitat mitjana de la canonada, a la intensitat del camp magnètic aplicat i al diàmetre de la canonada; per tant, al cabal.

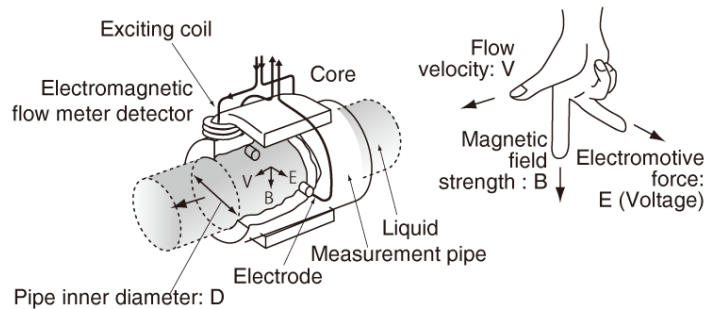


Figura 4.7. Esquema del funcionament dels cabalímetres electromagnètics.

Els avantatges de calcular el cabal mitjançant aquesta tècnica és que no genera pèrdues de pressió i és capaç de detectar el cabal de qualsevol líquid conductor elèctric que hi circuli per l'interior de la canonada, independentment que incloguin contaminants o no. [6]

4.1.4. Variador de freqüència

Per tal de poder variar i mesurar la velocitat de rotació de la bomba, s'utilitza un variador de freqüència del tipus FC-302, subministrat per l'empresa DANFOSS, connectat entre l'alimentació de la xarxa i el motor trifàsic. En concret, el variador de freqüència treballarà en llaç obert, sense cap realimentació cap al propi variador que permeti ajustar l'acció de control.

4.1.4.1. Funcionament del variador de freqüència

Un variador de freqüència (VFD) és un dispositiu electrònic que serveix per controlar principalment el parell, velocitat i sentit de gir d'un motor trifàsic de gàbia d'esquirol. El seu funcionament, com es pot veure a la Figura 4.8, es pot dividir en 3 etapes: la del convertidor de corrent alterna a corrent contínua, la del filtre LC i finalment la de l'inversor de corrent contínua a corrent alterna.

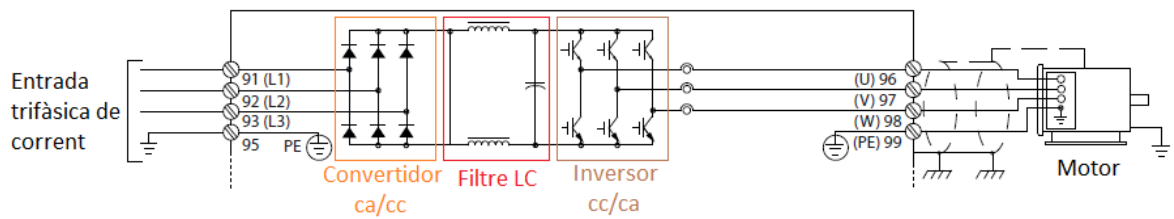


Figura 4.8. Esquema de les connexions elèctriques del VFD, separat per etapes.

En la primera etapa es produeix una rectificació no controlada d'ona completa mitjançant un pont de díodes, tal i com es mostra a la Figura 4.9. En la branca superior de díodes condueix en cada instant el díode que té més tensió en l'ànode, mentre que en la branca inferior condueix el díode que té més tensió negativa en el càtode de la corrent alterna. Degut al desfasament de 120° entre línies de la corrent alterna, cada 60° hi ha un canvi en el díode que condueix, resultant així el senyal de sortida arissat ($U_{sortida}$) que podem veure a la Figura 4.9. [7]

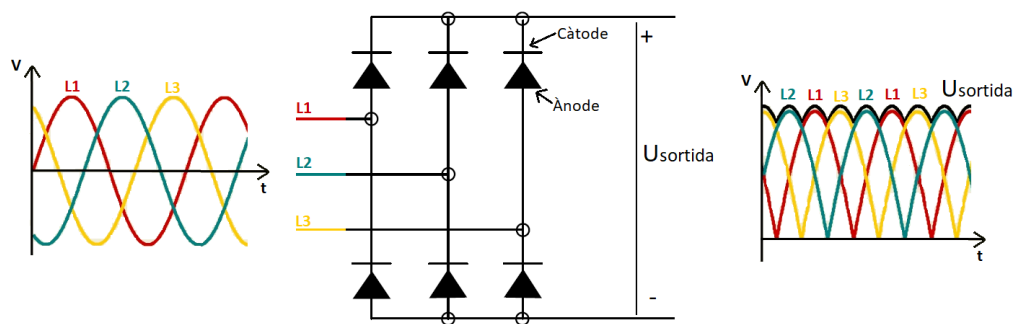


Figura 4.9. Funcionament del convertidor ca/cc.

La segona etapa consisteix en un filtre LC, format per una bobina, que es denomina amb la lletra L, i un condensador, que es denomina amb la lletra C. Mitjançant aquest filtre, com es veu a la Figura 4.10, s'aconsegueix eliminar l'arissat del senyal $U_{sortida}$ i aconseguir un corrent continu el més pla possible ($U'_{sortida}$).

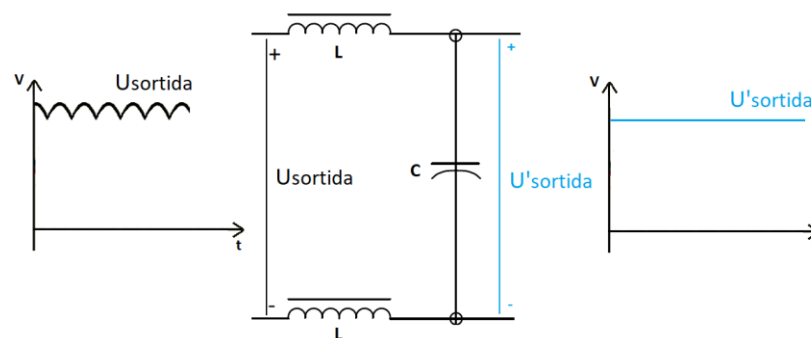


Figura 4.10. Funcionament del filtre LC.

Seguidament, es fa passar aquest senyal constant per un bus de contínua i, mitjançant l'activació selectiva dels transistors IGBT, s'aconsegueix convertir el voltatge $U'_{sortida}$ en un senyal de voltatge quadrat d'amplitud constant i amplada variable. Amb aquest senyal quadrat es pot modular un senyal sinusoidal fent servir el principi de la tècnica PWM (modulació de l'amplitud per polsos), ja que permet crear una fase del corrent trifàsic que alimentarà una línia del motor (U_{motor}), com es pot veure a la Figura 4.11.

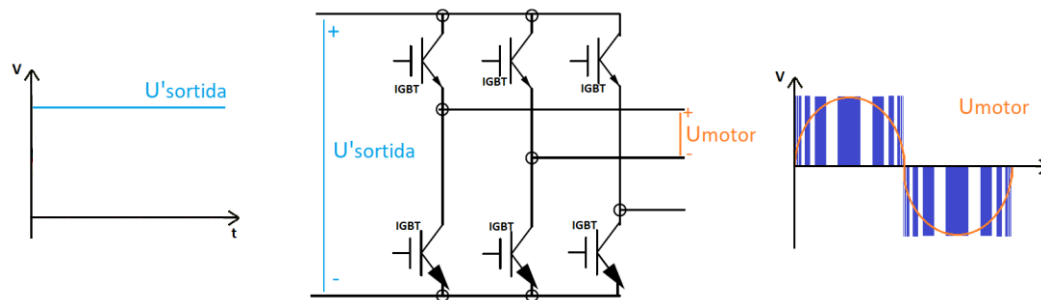


Figura 4.11. Funcionament del convertidor cc/ca.

En concret s'utilitza la tècnica SVPWM (de l'anglès 'Space Vector PWM'), amb la qual es controla l'activació selectiva dels transistors IGBT per variar la freqüència del senyal de sortida. També es pot modificar l'amplitud del senyal sinusoidal de sortida modificant l'amplada del senyal quadrat. [8]

4.1.4.2. Condicionament del variador de freqüència

Primerament, per alimentar el VFD s'han de connectar els cables corresponents a les fases del corrent d'entrada trifàsic de la xarxa en els terminals 91,92,93. Seguidament s'han de connectar els cables de les 3 fases de sortida per controlar el motor, corresponent als terminals 96,97,98. És important també connectar el terra comú de la xarxa i la sortida en els terminals 95 i 99, respectivament.

Es pot observar a la Figura 4.12 un dibuix de les connexions elèctriques proporcionat pel fabricant.

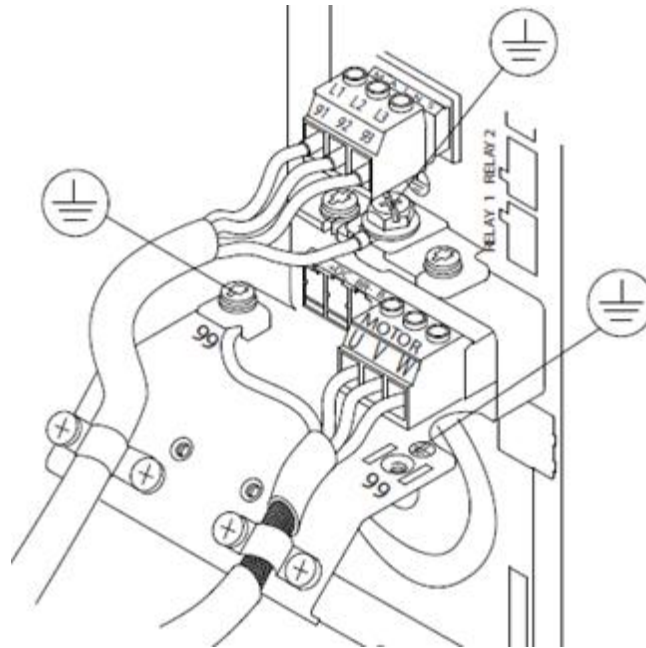


Figura 4.12. Esquema de les connexions elèctriques de la xarxa i al motor. Imatge extreta de la fulla d'especificacions tècniques del VFD de Danfoss. [8]

Després de connectar els cables és important introduir en el variador la informació pertinent al motor que està controlant, com és la potència nominal del motor (kW), la tensió (V), la freqüència nominal (Hz), el corrent consumit (A) i la velocitat de rotació nominal (rpm).

El motor que es fa servir per impulsar la bomba centrífuga de LOWARA és un motor trifàsic de gàbia d'esquirol, amb un encapsulat d'acer inoxidable i un parell de pols. Connectant les tres fases de 50 Hz en estrella, el motor consumeix 3 kW de potència, 400 V de voltatge, 6,03 A de corrent i presenta una velocitat de rotació nominal de 2850 rpm.

A la Figura 4.13 es mostra un exemple del variador de freqüència funcionant, el qual està fent girar el motor a un 100% de la seva velocitat nominal, és a dir, a 2850 rpm.



Figura 4.13. Variador de freqüència controlant la velocitat de gir del motor.

4.2. Característiques dels sistemes de mesura

Les característiques d'un sistema de mesura venen determinades per les característiques dels sensors i de les etapes d'acondicionament posteriors.

En general, els senyals provinents dels sensors tendeixen a variar molt lentament i, en aquests casos, és suficient descriure el comportament estàtic del sistema per caracteritzar-lo. Les característiques estàtiques més rellevants d'un sistema de mesura són: el rang de mesura, la precisió o exactitud, la característica estàtica i sensibilitat, la resolució, el rang dinàmic i la seva fidelitat, repetibilitat i reproductibilitat.

En canvi, si els senyals provinents dels sensors varien ràpidament, les característiques estàtiques no són suficients per caracteritzar-lo i cal descriure el seu comportament dinàmic en funció d'una variació concreta de l'entrada (com un senyal graó, per exemple).

4.2.1. Rang de mesura

El rang de mesura és l'interval de valors de la magnitud a mesurar per al qual el sistema de mesura és capaç de subministrar mesures amb un error acceptable. S'anomena abast a la diferència entre el valor màxim del rang de mesura calibrat (abreviat com URL) i el valor mínim del rang de mesura calibrat (abreviat com LRL). S'anomena fons d'escala (FE) al valor màxim del rang de mesura.

Per cada sensor s'ha escollit el rang de mesura que més s'ajusta al rang teòric en el que fluctuarà la magnitud física corresponent, ja que d'aquesta manera la mesura és més precisa. Per exemple, el sensor PT301, situat a la secció mínima del venturi, té un rang de mesura de 0 a 200 kPa; mentre que la resta de sensors situats al llarg del túnel tenen un rang de mesura de 0 a 600 kPa.

4.2.2. Precisió o exactitud

La precisió o exactitud (en anglès, "accuracy") d'un sistema de mesura és la qualitat que té un sistema de mesura per donar indicacions que s'aproximen al valor real de la magnitud mesurada. El valor real es considera sempre com el valor mesurat amb un sistema de mesura de més qualitat.

S'anomena error d'una mesura a la diferència entre el valor real i el valor mesurat. La magnitud de l'error comès en les mesures qualifica la qualitat del sistema de mesura, ja que a menys error es considera una qualitat superior.

En els sistemes analògics sempre existeixen errors de mesura en major o menor grau, grau que depèn de l'exactitud del sistema i del nivell de soroll original per l'entorn del sistema. El

sistema analògic es pot dissenyar pensant en reduir el soroll, però el soroll mai es pot eliminar del tot.

En els sistemes digitals, degut a la conversió a discret dels valors, l'error ve determinat pel nombre de bits emprats en la quantificació i pel marge d'immunitat al soroll de la tecnologia digital emprada

4.2.3. Característica estàtica i sensibilitat

La característica estàtica d'un sistema de mesura indica la relació entre la mesura obtinguda i el valor de la magnitud a mesurar en tot el rang de mesura. En els sensors, la mesura s'obté com un valor d'una magnitud elèctrica, mentre que la magnitud a mesurar pot ser qualsevol (pressió, temperatura, cabal,...).

Es considera que el comportament del sensor en tot el rang de mesura és lineal. En fer aquesta aproximació es comet un error, el qual és indicat pel fabricant a la fulla d'especificacions tècnica com un error màxim de linealitat per cada sensor. Per exemple, en el cas del sensor PT 301 presenta un rang de pressions de 0 a 200 kPa, que es tradueix en un rang de corrents de 4 a 20 mA. La conversió lineal que es fa és del tipus $P(kPa) = \alpha \cdot I(mA) - \beta$, on el pendent α i el desplaçament β valen:

$$\alpha = \frac{200 - 0}{20 - 4} = 12,5 \text{ kPa/mA}$$

$$\beta = \alpha \cdot I_{min} = 12,5 \cdot 4 = 50 \text{ kPa}$$

Així doncs, el sensor PT 301 segueix la distribució lineal que es descriu amb la funció $P(kPa) = 12,5 \cdot I(mA) - 50$.

La sensibilitat d'un sistema de mesura és el valor absolut del pendent (la derivada) de la seva característica estàtica.

Com que la característica estàtica dels sensors utilitzats s'aproxima com una recta, la sensibilitat d'aquests és constant i es pot calcular fàcilment com el quocient entre el rang del corrent de sortida i el rang del senyal d'entrada.

Pel sensor PT301 la sensibilitat correspon al pendent de la recta de la seva característica estàtica, és a dir, a $\alpha = 12,5 \text{ kPa/mA}$

4.2.4. Resolució i rang dinàmic

La resolució d'un sistema de mesura és el mínim canvi en la magnitud mesurada que sempre pot ser percebut a la sortida. La resolució d'un sensor vindrà limitada pel soroll

elèctric, que produirà canvis aleatoris no motivats per canvis a l'entrada i no diferenciable d'aquests.

S'anomena rang dinàmic (RD) d'un sistema de mesura al quocient entre el seu abast i la seva resolució. El rang dinàmic informa sobre la qualitat del sistema de mesura i, per tant, sobre la seva dificultat d'implementació.

En general es vol que la resolució sigui un valor molt petit respecte l'abast. Això fa que el rang dinàmic solgui ser un valor gran, que s'acostuma a expressar en decibels (dB).

$$RD = 20 \cdot \log\left(\frac{\text{abast}}{\text{resolució}}\right)$$

En el cas del processament digital, el rang dinàmic ve determinat pel nombre n de bits emprats en la quantificació.

$$RD = 20 \cdot \log\left(\frac{2^n}{1}\right) = 20 \cdot n \cdot \log(2) \approx 6 \cdot n$$

El RD total de la cadena d'adquisició de dades és el corresponent a l'etapa que tingui un RD menor.

En el cas del sensor de pressió PT 301 de rang 0 a 200kPa i una resolució de 1,6 μ A (corresponent a 0,02 kPa), té un rang dinàmic de $RD = 20 \cdot \log\left(\frac{200}{0,02}\right) = 80 \text{ dB}$. Amb aquest valor es pot buscar la resolució necessària de la quantificació per implementar-lo de forma digital, la qual indica que caldrien com a mínim 14 bits (RD=84 dB).

4.2.5. Fidelitat, repetibilitat i reproductibilitat

La fidelitat (en anglès, "*precision*") és la capacitat que caracteritza un sistema de mesura de donar el mateix valor de la magnitud mesurada en varies mesures fetes en les mateixes condicions. La fidelitat no implica que les mesures realitzades no continguin error, sinó que és una indicació de la dispersió de les mesures. En el cas de tenir un aparell de mesura poc fidel es pot fer la mitjana de moltes mesures per prevenir errors de fidelitat.

La repetibilitat és la capacitat que caracteritza a un sistema de mesura de donar el mateix valor de la magnitud mesurades en successives mesures fetes en un espai de temps curt.

La reproductibilitat és la capacitat que caracteritza a un sistema de mesura de donar el mateix valor de la magnitud mesurada, però tenint en compte canvis en l'entorn de mesura (condicions de l'entorn, instant de temps, etc.).

4.2.6. Característiques dels sensors utilitzats

A la Taula 4.1 es recullen algunes d'aquestes característiques per cada un dels sensors utilitzats:

Sensor	Magnitud mesurada	Tipus	Rang	Resolució	Sensibilitat	RD
PT100	Pressió absoluta	PMC-21	0 - 600 kPa	0,06 kPa	37,5 kPa /mA	80 dB
PT200	Pressió absoluta	PMC-21	0 - 600 kPa	0,06 kPa	37,5 kPa /mA	80 dB
PT400	Pressió absoluta	PMC-21	0 - 600 kPa	0,06 kPa	37,5 kPa /mA	80 dB
PT401	Pressió absoluta	PMC-21	0 - 600 kPa	0,06 kPa	37,5 kPa /mA	80 dB
PT302	Pressió absoluta	PMC-21	0 - 600 kPa	0,06 kPa	37,5 kPa /mA	80 dB
PT301	Pressió absoluta	PMC-21	0 - 200 kPa	0,02 kPa	12,5 kPa/mA	80 dB
PT300	Pressió absoluta	PMC-21	0 - 600 kPa	0,06 kPa	37,5 kPa /mA	80 dB
TT100	Temperatura	TR11-C	0° - 120° C	0,2° C	17,5° C/mA	55,56 dB
TT200	Temperatura	TR11-C	0° - 120° C	0,2° C	17,5° C/mA	55,56 dB
FIT400	Cabal	FEP311	0 - 180 m ³ /h	0,72 m ³ /h	11,25 (m ³ /h)/mA	47,96 dB
VFD	Freqüència	FC-302	0 - 2850 rpm	0,71 rpm	178,13 rpm/mA	72 dB

Taula 4.1. Característiques dels sensors utilitzats.

5. Cadena de mesures

Els senyals que es capten del món real mitjançant els sensors són senyals analògics, però el seu processament s'ha de fer de forma digital, per tant cal convertir la informació present en el senyal analògic a digital mitjançant un convertidor analògic-digital.

Com que la sortida d'alguns sensors és un senyal passiu, també és necessari la introducció d'una font de tensió en el sistema d'adquisició per poder alimentar correctament aquells sensors que ho necessitin per poder generar correctament la sortida entre 4 a i 20 mA.

5.1. Mòdul NI-9208

Totes les sortides analògiques proporcionades pels sensors es connecten al mòdul de la sèrie C de National Instruments NI-9208 amb 16 canals. En aquest mòdul el senyal d'entrada és escanejat, filtrat i, posteriorment, mostrejat amb un convertidor analògic-digital (ADC) de 24 bits. A més, aquest mòdul proporciona una protecció de sobretensió per a cada canal. [9]

Com que el mòdul només té un convertidor analògic-digital és necessari seleccionar quina entrada ha de passar en cada moment pel convertidor. Per aquesta raó es fa servir un multiplexor (anomenat MUX), el qual es pot entendre com una bateria d'interruptors, un entre cada entrada i la sortida del multiplexor, que permet seleccionar l'entrada corresponent. La sortida del multiplexor és amplificada per passar a un posterior convertidor ADC.

El convertidor analògic-digital (ADC) admet rangs de corrents de -20 a 20 mA, presenta una resolució de 24 bits a la seva sortida i té una freqüència de mostreig màxima de 500 mostres/s. El convertidor està basat en un modulador sigma-delta ($\Sigma\Delta$), el qual mostreja el senyal d'entrada a una freqüència molt major a la de Nyquist (*sobremostreig*), però amb un sol bit de resolució en l'amplitud. Per tal d'augmentar la resolució es fa la mitjana de la sortida del modulador mitjançant un filtre passabaixos, seguit d'un decimador que converteix el senyal d'un bit (*bitstream*) en una seqüència de bits (senyal digital) a la freqüència de Nyquist. [10]

L'esquema electrònic simplificat del funcionament d'aquest mòdul és el que es pot veure a la Figura 5.1. S'observa que el terminal amb el prefix "AI" correspon al terminal d'entrada del senyal analògic, numerat del 0 al 15 (16 canals). El terminal "COM", en canvi, correspon a la connexió a terra del mòdul. Cal tenir en compte que si el senyal provinent del sensor és un senyal passiu és necessari subministrar-hi tensió, per això s'ha de subministrar voltatge al terminal "V_{sup}" mitjançant una font que subministri una tensió constant de 24 V.

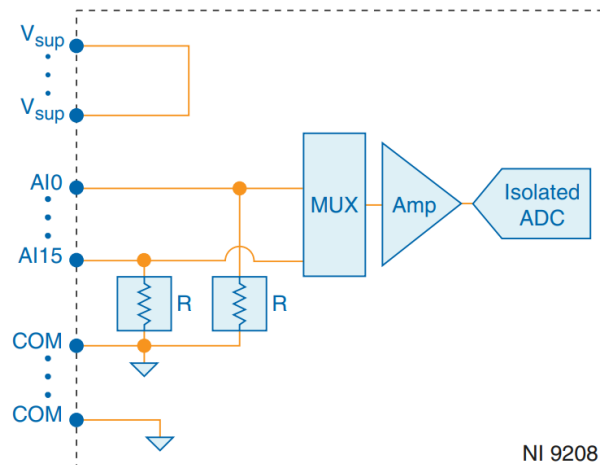


Figura 5.1. Esquema electrònic simplificat del mòdul NI-9208.

Aquest mòdul permet escollir entre dos tipus de modes per tal de realitzar la conversió analògica-digital, el mode d'alta velocitat i el d'alta resolució. El mode d'alta velocitat triga un temps de 2 ms a fer la conversió per canal, mentre que el mode d'alta resolució triga 52 ms. Amb aquesta informació és pot calcular la freqüència màxima d'adquisició de dades depenent del mode utilitzat per fer la conversió, que correspon a una limitació de 500 mostres/s pel mode d'alta velocitat i 20 mostres/s pel mode d'alta resolució.

5.1.1. Connexió dels sensors al mòdul NI-9208

Per tal de connectar-hi cada sensor s'observa la part lateral del mòdul a la Figura 5.2, on es mostra la informació referent a les connexions de cada sensor. Es pot veure que, en el cas de connectar un senyal passiu, s'ha de connectar el terminal positiu al terminal amb voltatge " V_{sup} ", mentre que si es connecta un senyal actiu n'hi ha prou amb connectar-lo directament al terminal negatiu "COM".

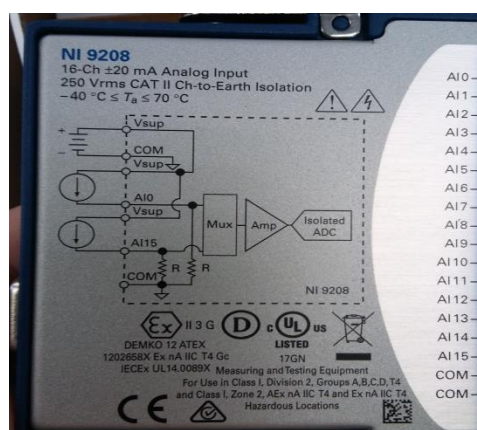


Figura 5.2. Informació del lateral del mòdul referent a les connexions dels sensors.

5.1.2. Connexió elèctrica del sensor de pressió PMC-21:

Per tal d'alimentar el sensor PMC-21 i poder transmetre totes les dades que aquest enregistra, el sensor porta incorporat un cable de connexió M12 amb 4 pols, el qual només admet una posició possible que encaixa amb l'alimentació del sensor. Aquest tipus de connexió permet un estalvi de costos perquè ofereix una instal·lació ràpida i senzilla, al igual que un estalvi d'espai gràcies a la compactació de tots els seus cables, tal i com es mostra a la Figura 5.3.

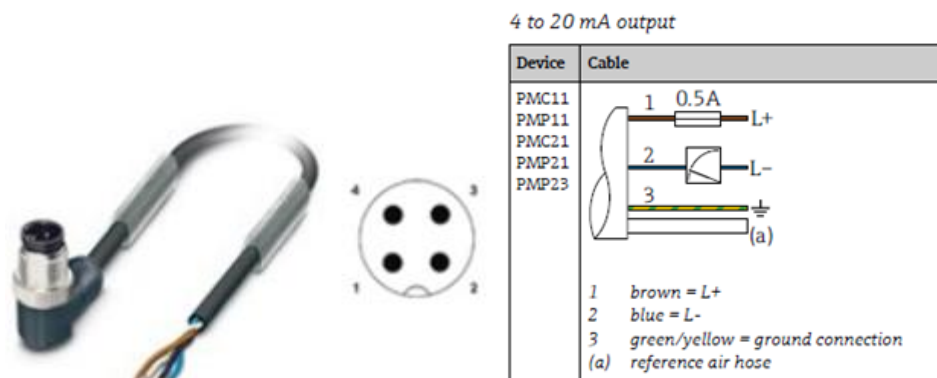


Figura 5.3. Connexió M12 amb 4 pols per alimentar el sensor de pressió PMC-21. Imatge extreta de la fulla d'especificacions tècniques del sensor PMC-21. [2]

Per saber quin color correspon a quin terminal, Endress&Hausser proporciona la informació que es mostra a la Figura 5.3 per facilitar el muntatge, de manera que el cable marró correspon al terminal positiu L+ (connectat al terminal "V_{sup}") i el cable blau correspon al terminal negatiu L- (connectat al terminal "AI" que es correspongui). [11]

5.1.3. Connexió elèctrica del sensor de temperatura TR11-C

Per tal d'alimentar el sensor TR11-C i extreure les mesures, es fa servir el transmissor T15.H, també proporcionat per WIKA, el qual ofereix una protecció en contra de les pertorbacions electromagnètiques, una major exactitud i un rang de temperatures de mesura de 0 a 120° C.

Primerament cal connectar els cables pertinents de les termoresistències al capçal, tal i com indiquen els números (2) (3) i (4) de la Figura 5.4.

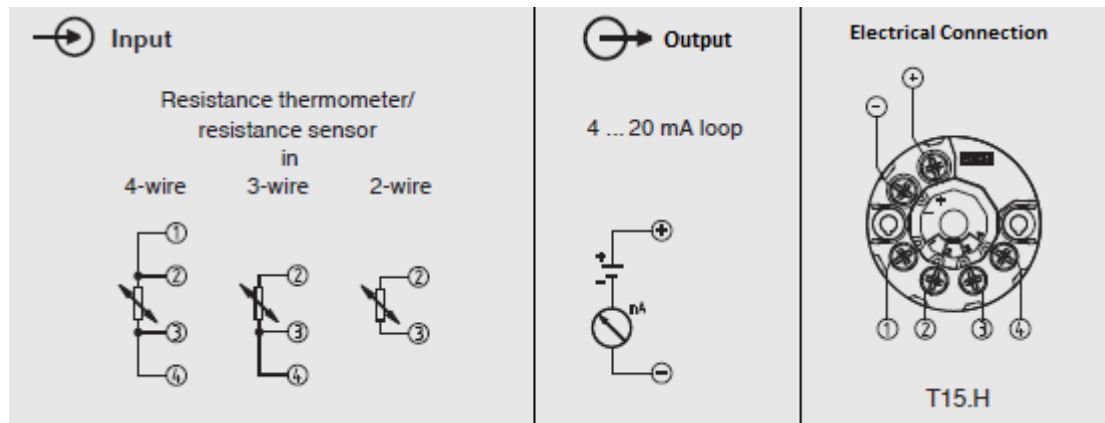


Figura 5.4. Esquema de les connexions elèctriques del sensor de temperatura. Imatge extreta de la fulla d'especificacions tècniques del sensor TR11-C. [5]

Seguidament s'han de connectar dos cables a la sortida analògica corresponents als terminals (+) i (-) del transmissor T15.H, els quals proporcionen una sortida entre 4 i 20 mA proporcionals a la temperatura. Com s'indica a la Figura 5.4, aquesta sortida és una sortida passiva, ja que hi ha d'haver una font de tensió entre els terminals de sortida per poder donar un senyal de 4 a 20 mA, per aquesta raó es connecta el terminal positiu amb el terminal " V_{sup} " del mòdul i el terminal negatiu amb el terminal "AI" corresponent.

Per tal de connectar el sensor fins al mòdul NI-9208 es fa servir un cable blindat amb 2 fils, el qual està recobert per una malla que actua de gàbia de Faraday per tal d'evitar l'acoblament de soroll i altres interferències entre el cable i l'exterior.

5.1.4. Connexió elèctrica del cabalímetre FEP311

Per tal d'alimentar el cabalímetre es pot fer mitjançant corrent alterna o corrent continua. En el cas de connectar el sensor amb corrent alterna s'han de connectar els cables corresponents al cable de línia, al neutre i el terra en els terminals que es poden observar a la Figura 5.5.

En el cas d'alimentar el sensor amb corrent contínua de 24 V es fan servir els mateixos terminals però aquesta vegada corresponent al terminal positiu, negatiu i terra, respectivament.

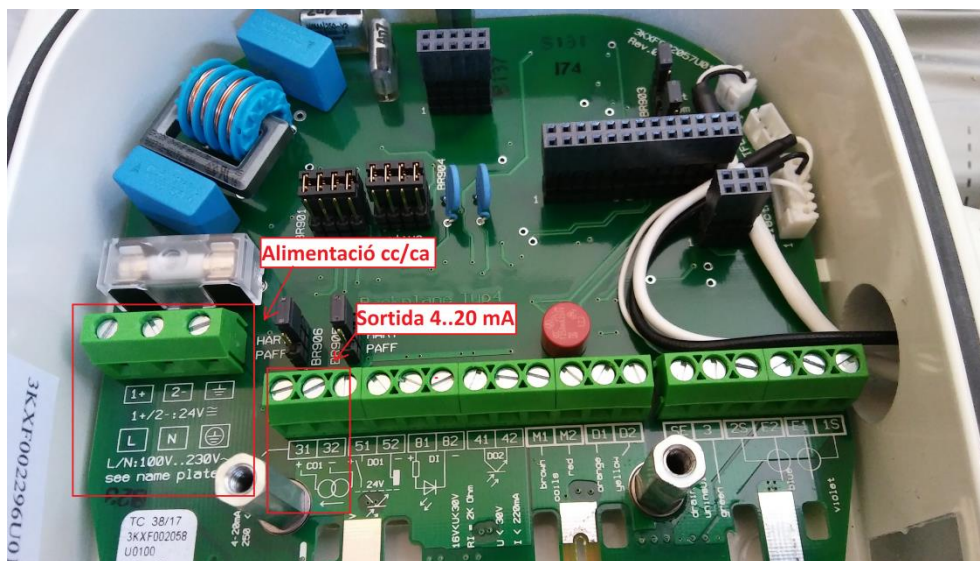


Figura 5.5. Connexions elèctriques del cabalímetre electromagnètic.

Pel que fa al corrent de sortida, el transductor fa servir el protocol HART (acrònim del anglès *"Highway Addressable Remote Transducer"*) mitjançant el qual comunica des de l'instrument un llaç de corrent estàndard de 4 a 20 mA pels terminals 31 i 32, juntament amb informació agregada sobre un senyal digital. Aquesta informació acostumen a ser paràmetres bàsics de configuració, alertes de diagnòstic, variables de procés i unitats i, fins i tot, pot incloure el fabricant i l'etiqueta del dispositiu.

Com es pot observar en l'esquema imprès sota els números dels terminals 31 i 32 a la *Figura 5.5*, aquesta sortida també és passiva, ja que necessita una font de tensió per funcionar. Per aquesta raó es connectarà el terminal de sortida 31 (positiu) amb l'entrada del mòdul "V_{sup}" i el terminal 32 (negatiu) amb l'entrada del mòdul "AI" corresponent.

5.1.5. Connexió elèctrica del variador de freqüència

Per poder extreure en cada moment la velocitat de rotació del motor cap al sistema d'adquisició de dades és important connectar la sortida analògica corresponent al terminal 42. Aquesta sortida, a diferència de la sortida dels altres sensors utilitzats en el sistema d'adquisició de dades, és una sortida activa, és a dir, és un senyal que no necessita font d'alimentació externa per funcionar, per tant n'hi ha prou en connectar-la directament a l'entrada "AI" corresponent del mòdul NI-9208.

La sortida, la qual va de 4 a 20 mA, proporciona informació referent a la velocitat de rotació del motor, la qual va de 0 a 2850 rpm regulables. [12]

5.2. Font d'alimentació NIPS-16

Per tal d'alimentar cada sensor es fa servir la font d'alimentació NI PS-16 proporcionada per National Instruments, com es veu a la Figura 5.6, la qual subministra una sortida de tensió constant de 24 V, fins a 10 A de corrent contínu i 240 W de potència. La entrada de la font de tensió és una fase del corrent altern de 50 Hz, la qual té una tensió de línia de 230 V_{AC}. [13]



Figura 5.6. Font d'alimentació NI PS-16.

La font d'alimentació té un potenciòmetre incorporat per regular la tensió contínua de sortida, la qual s'ha de fixar a 24 V.

Per tal d'alimentar la font de tensió es connectaran els cables corresponents al neutre (cable de color blau), una fase del corrent altern (cable de color marró) i el terra (cable de color groc i verd) de la xarxa als terminals indicats a la Figura 5.7.



Figura 5.7. Connexions a la xarxa de la font de tensió per alimentar els sensors.

La font NI PS-16 té un total de quatre terminals de sortida, proporcionant dos terminals positius de sortida i dos terminals negatius de sortida. Els dos terminals positius estan connectats internament entre ells i els dos terminals negatius també estan connectats internament entre ells, per tant els terminals de sortida proporcionen 24 V_{DC} amb 10 A de corrent. Per tal d'alimentar els sensors s'han de connectar els 24 V de tensió contínua al terminal del mòdul NI-9208 "V_{sup}" i un dels terminals negatius al terminal "COM".

5.3. Xassís CompactDAQ NI-9185

Per tal d'alimentar el mòdul i connectar-lo a l'ordinador es fa servir el xassís CompactDAQ de National Instruments que controla la temporització, sincronització i transferència de dades entre els mòduls de la sèrie C i un servidor extern. [14]

El xassís compta amb 4 possibles connexions de mòduls de la sèrie C, de les quals només en farem servir una per connectar el mòdul NI-9208. El xassís s'alimenta mitjançant el seu propi cable, el qual es connecta directament a la xarxa i subministra una tensió contínua al xassís. Finalment, per connectar el xassís amb l'ordinador, aquest compta amb una connexió ethernet per la que es comuniquen totes les dades, digitalitzades al mòdul NI-9208.

A la Figura 5.8 es pot observar, d'esquerra a dreta, la connexió del xassís a la xarxa elèctrica, la sortida ethernet per connectar-ho amb l'ordinador i el mòdul NI-9208 on es

connecten les sortides dels sensors.



Figura 5.8. Xassís CompactDAQ NI-9185.

5.4. Posada en marxa

Primerament, una vegada connectats els sensors al mòdul NI-9208 i alimentat el xassís compact DAQ, cal connectar el cable ethernet al xassís i al nostre ordinador. Posteriorment, mitjançant l'aplicació NI MAX (*Measurement & Automation Explorer*) es pot visualitzar els dispositius connectats a l'ordinador.

En la part esquerra de la Figura 5.9 es veu que s'ha detectat el xassís i el mòdul de National Instruments correctament. En el cas que no es connecti automàticament, cal reservar el xassís seleccionant el botó “*Reserve Network Device*”, el qual està indicat amb un requadre vermell en part superior de la Figura 5.9.

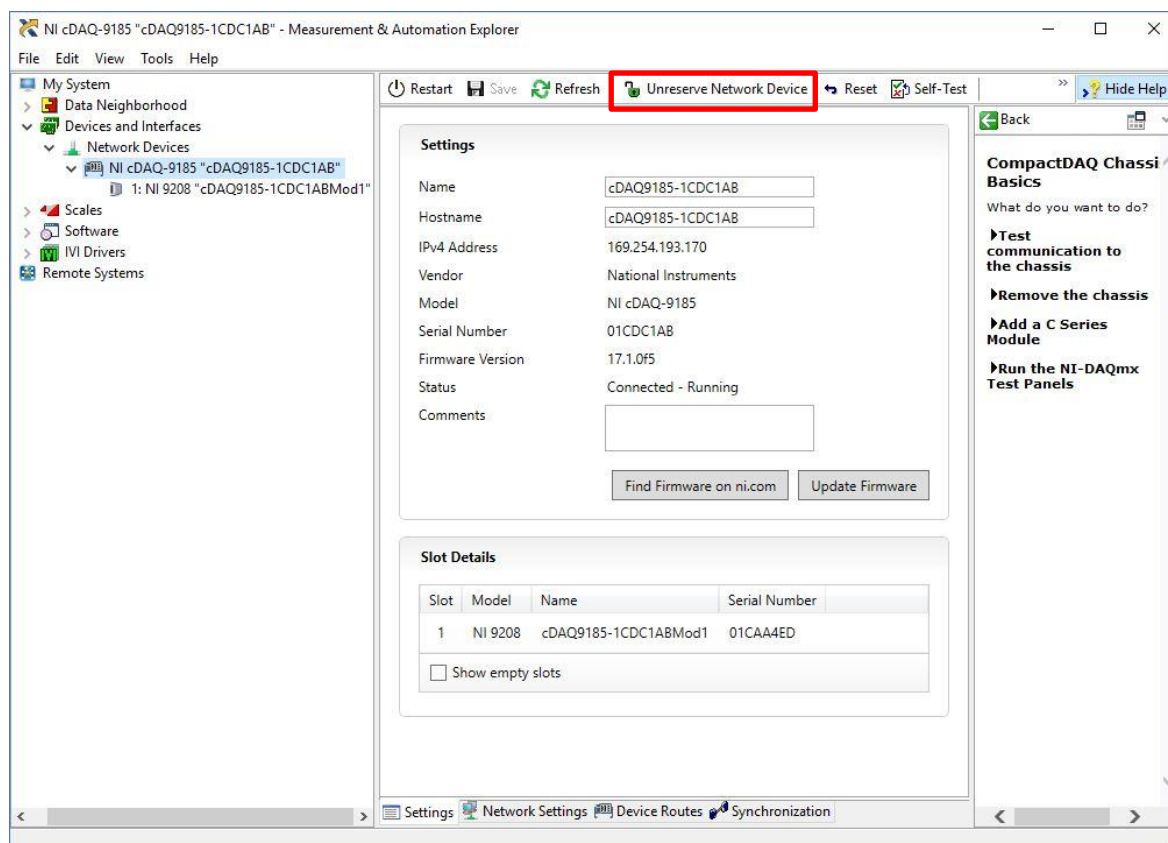


Figura 5.9. Captura de pantalla del NI MAX.

Per defecte, poden accedir diversos usuaris al xassís CompactDAQ, però, per poder extreure informació i treballar amb el mòdul NI-9208, és necessari que es reservi el xassís.

6. Estudi d'errors i incertesa

Els instruments de mesura no són sistemes ideals sinó reals, per tant tenen una sèrie de limitacions que s'han de tenir en compte a l'hora d'obtenir els resultats i poder jutjar la veracitat d'aquests.

6.1. Incertesa de les mesures primàries

Totes les mesures estan subjectes a una incertesa i un valor mesurat només és complet si està acompanyat per una incertesa associada. Les incerteses poden ser de dos tipus: sistemàtiques o aleatòries. [15]

Les **incerteses sistemàtiques** ($\delta U_{sistemàtica}$) depenen principalment del calibratge dels instruments, de la seva resolució, de les interferències que presenta,... però, en tot cas, poden ser corregides tornant a calibrar els instruments o aplicant un factor de correcció a la mesura realitzada.

Les **incerteses aleatòries** (δU_{random}), en canvi, estan associades a la no repetibilitat d'una seqüència de mesures d'una mateixa magnitud real que es manté constant. Aquestes són degudes a la combinació de factors com la baixa precisió de l'aparell o la resolució del sensor/instruments, errors de lectura o pertorbacions ambientals transitòries. Per tal de disminuir-les s'han d'aplicar mètodes estadístics per calcular valors mitjans i desviacions.

Degut a la rapidesa de l'adquisició de dades, es considera que som capaços de recollir en poc temps una gran quantitat de dades, per tant, segons el teorema central del límit podem considerar que les mostres segueixen una distribució normal. Considerant la hipòtesi d'una distribució normal de les mostres, es pot calcular la mitjana \bar{x} i la desviació estàndard s de cada n mostres i calcular l'interval de confiança del 95% ($\alpha = 0,05$), el qual es l'interval de valors en el que hi ha una probabilitat del 95% de que el valor real hi estigui inclòs. Considerant un interval de confiança del 95% s'obté que la incertesa aleatòria de les dades és:

$$\delta U_{random} = \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = \pm 1,96 \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6.1)$$

on $z_{\frac{\alpha}{2}}$ és el valor de la distribució normal, amb mitjana 0 i desviació 1, que deixa a la seva dreta una àrea de $\frac{\alpha}{2}$. Per un interval de confiança del 95% (nivell de significació $\alpha = 0,05$) aquest valor és 1,96.

Quan es tenen diferents tipus d'incerteses d'una mesura (provinent de diferents factors i

independents entre ells) és necessari estimar la incertesa total combinant les incerteses conegudes. D'aquesta manera, fent l'arrel de la suma de quadrats (RSS) es pot calcular la incertesa total d'una variable (δU) tenint en compte les altres incerteses ($\delta U_{sistemàtica}, \delta U_{random}$):

$$\delta U = \pm \left(\sum_i \delta U_{sistemàtica,i}^2 + \sum_i \delta U_{random,i}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.2)$$

Al llarg de tota la cadena d'adquisició de dades es produeix una propagació de la incertesa, ja que cada aparell per on es transmet la informació té una incertesa associada. Considerant com a exemple un sensor de pressió PMC-21 es pot observar a la Figura 6.1 la propagació de la incertesa des de que es fa la mesura en el sensor fins que arriba a l'ordinador.

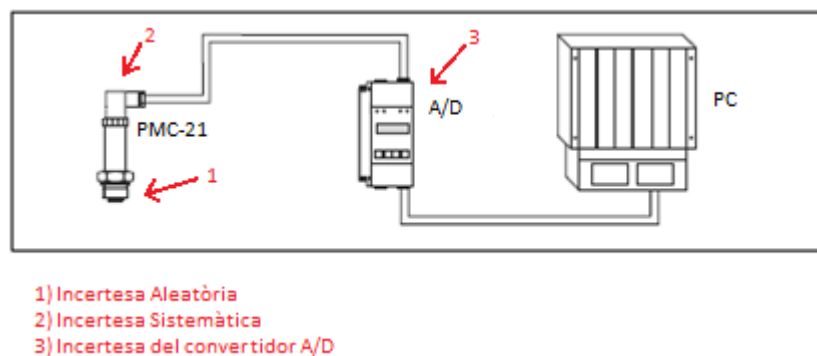


Figura 6.1. Propagació de la incertesa al llarg del sistema d'adquisició de dades.

Primerament es té en compte la **incertesa aleatòria** (δU_{random}) deguda a la variabilitat de les mostres degut a les fluctuacions del voltatge DC en l'adquisició del senyal, al soroll que hi ha present en l'ambient, etc. Per quantificar aquesta incertesa es considera que totes les mostres segueixen una distribució normal i, considerant un interval de confiança del 95%, s'aplica l'equació (6.1).

Seguidament, un cop s'ha fet la transducció del senyal físic corresponent en el sensor, es considera la **incertesa sistemàtica** ($\delta U_{sistemàtica}$) que es produeix com a conseqüència del calibratge de l'instrument, la seva resolució, errors de no linealitat, repetibilitat i histèresi. Algunes d'aquestes dades són proporcionades pel propi fabricant del sensor.

Cada sensor té una incertesa sistemàtica diferent, que depèn del calibratge que li han fet a la fàbrica. Per tal d'acotar al màxim aquesta incertesa en els sensors més crítics en l'experiment, s'han enviat a calibrar i s'han fet servir les incerteses sistemàtiques proporcionades per l'empresa encarregada d'aquest calibratge [Annex1].

Finalment, la **incertesa del convertidor analògic-digital** (δU_{ADC}) és deguda a la conversió

d'una mesura contínua analògica (nombre infinit de punts) a una digital discreta (nombre finit de punts). Per obtenir un senyal digital de n bits el convertidor parteix el senyal analògic continu en 2^n rangs discrets, per tant aquesta incertesa es produeix degut a l'error de mantenir el senyal mostrejat entre dues mostres consecutives. A la part esquerra de la Figura 6.2 es mostra un exemple del manteniment d'un senyal mostrejat i a la dreta es mostra la importància de fer servir un nombre elevat de bits en la conversió, ja que com més bits es facin servir més petit serà l'error de conversió.

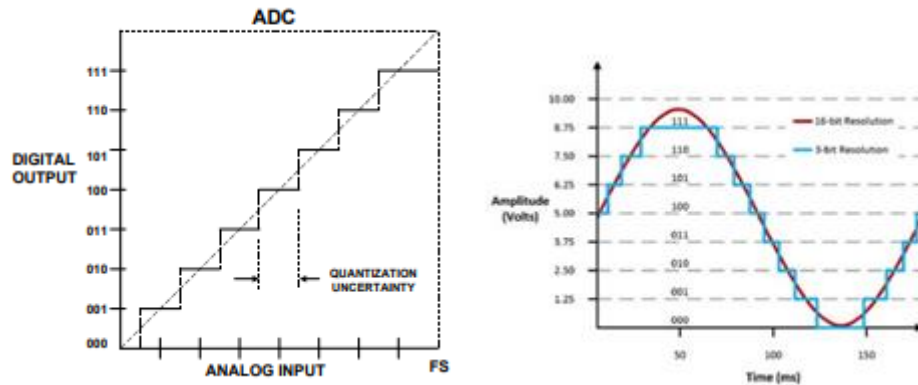


Figura 6.2. Representació gràfica de la conversió analògica-digital del convertidor.

D'aquesta manera, es poden considerar 4 tipus diferents d'error en el convertidor analògic-digital: l'error de guany que correspon a un $\pm 0,76\%$ de la lectura (δU_{gain}), l'error de compensació que correspon a un $\pm 0,04\%$ del rang (δU_{offset}), un petit error degut al soroll del mode de conversió (*InputNoise*) i l'error de la conversió corresponent a $\pm \frac{1}{2} LSB$ (δU_{LSB}).[13]

Donat que el convertidor que es fa servir té una resolució de 24 bits i un rang de -22 a 22 mA es té que la incertesa del convertidor és:

$$\delta U_{ADC} = \pm(\delta U_{gain} + \delta U_{offset} + InputNoise + \delta U_{LSB}) \quad (6.3)$$

On cada incertesa es calcula de la següent manera:

$$\delta U_{gain} = 0,76\% \cdot lectura[mA]$$

$$\delta U_{offset} = 0,04\% \cdot (22 - (-22))mA = \pm 17,6 \mu A$$

$$InputNoise = \begin{cases} 50 \text{ nArms pel mode d'alta resolució} \\ 200 \text{ nArms pel mode d'alta velocitat} \end{cases}$$

$$\delta U_{LSB} = \frac{1}{2} \cdot LSB = \frac{1}{2} \cdot \frac{(22 - (-22))mA}{2^{24}bits} = \pm 1,311 \frac{nA}{bit}$$

Finalment, tenint en compte totes les incerteses presents a la cadena de mesura (calculades amb les equacions (6.1) i (6.3)) es pot calcular la incertesa d'una mesura fent la propagació de la incertesa amb l'equació (6.2):

$$\delta U = (\delta U_{random}^2 + \delta U_{sistemàtica}^2 + \delta U_{ADC}^2)^{\frac{1}{2}}$$

6.2. Incertesa de les variables derivades

Per calcular la incertesa dels factors que deriven de mesures primàries, que són les que es mesuren directament amb el sistema d'adquisició de dades, és important conèixer el concepte de propagació de la incertesa. Suposant que una variable U és funció de dues mesures primàries $f(u_1, u_2)$ i que δu_1 i δu_2 són les incerteses de les variables primàries, llavors la incertesa es propaga fent l'arrel de la suma de quadrats de les incerteses dels components de la següent manera:

$$\delta U = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial U(u_1, u_2)}{\partial u_1} \cdot \delta u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial U(u_1, u_2)}{\partial u_2} \cdot \delta u_2\right)^2} \quad (6.4)$$

Per tant, pel càlcul de la incertesa de cada variable derivada és necessari calcular les corresponents derivades parcials:

- Per la densitat, calculada amb l'equació (3.1), com que es funció de la temperatura es calcula la seva derivada parcial en funció de la temperatura:

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\left(0 \cdot B^{1+(1-\frac{T}{C})^D}\right) - \left(A \cdot B^{1+(1-\frac{T}{C})^D} \cdot \ln(B) \cdot D \cdot \left(1-\frac{T}{C}\right)^{D-1} \cdot -\frac{1}{C}\right)}{B^{2 \cdot \left(1+(1-\frac{T}{C})^D\right)}} = \frac{A \cdot B^{-1-(1-\frac{T}{C})^D} \cdot \ln(B) \cdot D \cdot \left(1-\frac{T}{C}\right)^{D-1}}{C}$$

Finalment, aplicant l'equació (6.2), la incertesa de la densitat queda:

$$\delta U_{\rho} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \delta T\right)^2} = \pm \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \delta T\right) = \pm \frac{A \cdot B^{-1-(1-\frac{T}{C})^D} \cdot \ln(B) \cdot D \cdot \left(1-\frac{T}{C}\right)^{D-1}}{C} \cdot \delta T \quad (6.5)$$

- La pressió de saturació, calculada mitjançant l'equació (3.2), depèn de temperatura. Per tant, es calcula la derivada parcial de la pressió de saturació en funció de la variable primària:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_{sat}}{\partial T} &= A' \cdot e^{[(B' - \frac{T}{C'}) \cdot (\frac{T}{D' + T})]} \cdot \left[-\frac{1}{C'} \cdot \left(\frac{T}{D' + T} \right) + \left(B' - \frac{T}{C'} \right) \cdot \left(\frac{1 \cdot (D' + T) + (T) \cdot 1}{(D' + T)^2} \right) \right] \\ &= A' \cdot e^{T \cdot \frac{(B' - \frac{T}{C'})}{D' + T}} \cdot \left(-\frac{T}{C' \cdot (D' + T)} + \frac{B' - \frac{T}{C'}}{D' + T} - T \cdot \frac{B' - \frac{T}{C'}}{(T + D')^2} \right)\end{aligned}$$

Que es pot simplificar com:

$$\frac{\partial P_{sat}}{\partial T} = -\frac{A' \cdot (T^2 + 2D'T - B'C'D') \cdot e^{\frac{T \cdot (B' - \frac{T}{C'})}{T + D'}}}{C' \cdot (T + D')^2}$$

Finalment, aplicant l'equació (6.2), la incertesa de la pressió de saturació resulta:

$$\delta U_{P_{sat}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \cdot \delta T \right)^2} = \pm \left(\frac{\partial P_{sat}}{\partial T} \cdot \delta T \right) = \pm \frac{A' \cdot (T^2 + 2D'T - B'C'D') \cdot e^{\frac{T \cdot (B' - \frac{T}{C'})}{T + D'}}}{C' \cdot (T + D')^2} \cdot \delta T \quad (6.6)$$

- El nombre de cavitació, calculat segons l'equació (3.4), depèn de 3 variables primàries: el cabal, la temperatura i la pressió a l'entrada del venturi. Per aquesta raó s'han de calcular les tres derivades parcials del nombre de cavitació en funció d'aquestes.
 - La derivada parcial del número de cavitació en funció de la pressió d'entrada és:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial P_{in}} = \frac{1}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{in}^2} = \frac{2}{\rho \cdot v_{in}^2} \quad (6.7)$$

Per simplificar els càlculs, es substitueixen els termes referents a la densitat i la pressió de saturació de l'equació (3.4) per les seves respectives equacions (3.1) i (3.2). S'ha de tenir en compte que la temperatura en l'equació de la ρ (3.1) està expressada en K i la temperatura en l'equació de la P_{sat} (3.2) està expressada en °C, per tant és necessari fer la conversió de K a °C :

$$\begin{aligned}\sigma(P_{in}, T, Q) &= \frac{P_{in} - P_{sat}(T)}{\frac{1}{2} \cdot \rho(T) \cdot v_{in}(Q)^2} = \frac{P_{in} - A' \cdot e^{\left[\left(B' - \frac{T}{C'}\right) \cdot \left(\frac{T}{D' + T}\right)\right]}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{A}{B^{1 + \left(1 - \frac{T + 273,15}{C}\right)^D} \cdot v_{in}(Q)^2}} = \\ &= \frac{\left(2 \cdot B^{\left(1 - \frac{T + 273,15}{C}\right)^D + 1} \cdot \left(P_{in} - A' \cdot e^{\left[\left(B' - \frac{T}{C'}\right) \cdot \left(\frac{T}{D' + T}\right)\right]}\right)\right)}{A \cdot v_{in}(Q)^2}\end{aligned}$$

- La derivada parcial respecte a la temperatura (en ° C) i fent servir les constants de (3.1) i (3.2) queda:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma}{\partial T} &= \\ &= - \frac{2 \cdot B^{\left(1 - \frac{T + 273,15}{C}\right)^D + 1} \cdot \ln(B) \cdot D \cdot \left(1 - \frac{T + 273,15}{C}\right)^{D-1} \cdot \left(P_{in} - A' \cdot e^{T \cdot \frac{\left(B' - \frac{T}{C'}\right)}{T + D'}}\right)}{A \cdot C \cdot v_{in}^2} \quad (6.8) \\ &- \frac{2 \cdot B^{\left(1 - \frac{T + 273,15}{C}\right)^D + 1} \cdot A' \cdot \left(-\frac{T}{C' \cdot (T + D')} + \frac{\left(B' - \frac{T}{C'}\right)}{T + D'} - \frac{T \cdot \left(B' - \frac{T}{C'}\right)}{(T + D')^2}\right) \cdot e^{T \cdot \frac{\left(B' - \frac{T}{C'}\right)}{T + D'}}}{A \cdot v_{in}^2}\end{aligned}$$

- La derivada parcial respecte al cabal surt:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial Q} = \frac{-2 \cdot (P_{in} - P_{sat})}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{Q}{A_{in}}\right)^3 \cdot A_{in}} = -4 \cdot A_{in}^2 \cdot \frac{P_{in} - P_{sat}}{\rho \cdot Q^3} \quad (6.9)$$

On A_{in} és l'àrea de la secció d'entrada al Venturi, és a dir, $0,072^2 \text{ m}^2 = 5,184 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

Finalment, agrupant (6.7), (6.8) i (6.9) obtenim la incertesa del número de cavitació:

$$\delta U_{\sigma} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma}{\partial P_{in}} \cdot \delta P_{in}\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial Q} \cdot \delta Q\right)^2} \quad (6.10)$$

- La potència hidràulica generada a la bomba, calculada amb l'equació (3.5), depèn de la pressió a l'entrada de la bomba, la pressió a la sortida de la bomba i del cabal.
 - La derivada parcial de la potència hidràulica respecte a la pressió d'entrada:

$$\frac{\partial N_{hidràulica}}{\partial P_1} = -Q \quad (6.11)$$

- La derivada parcial de la potència hidràulica respecte a la pressió de sortida:

$$\frac{\partial N_{hidràulica}}{\partial P_2} = Q \quad (6.12)$$

- La derivada parcial de la potència hidràulica respecte al cabal:

$$\frac{\partial N_{hidràulica}}{\partial Q} = \Delta P + \rho g \Delta h + \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{3Q^2}{A_2^2} - \frac{3Q^2}{A_1^2} \right) \quad (6.13)$$

On A_2 és l'àrea a la sortida de la bomba (1604,6 mm²) i A_1 és l'àrea a l'entrada de la bomba (3610,35 mm²)

Finalment, agrupant les equacions (6.11), (6.12) i (6.13) s'obté la incertesa de la potència hidràulica:

$$\delta U_{N_{hidràulica}} = \sqrt{(-Q) \cdot \delta P_1 + Q \cdot \delta P_2 + \left(\Delta P + \rho g \Delta h + \frac{3Q^2 \rho}{2} \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \right) \cdot \delta Q} \quad (6.14)$$

- La calor específica mitjana, calculada amb l'equació (3.6), depèn exclusivament de la temperatura. Per tant, es fa la derivada parcial de la calor específica respecte a la temperatura:

$$\frac{\partial C_p}{\partial T} = \frac{B''}{10^3} + \frac{2 \cdot C'' \cdot T}{10^6} + \frac{3 \cdot D'' \cdot T^2}{10^9} - \frac{2 \cdot E'' \cdot 10^6}{T^3}$$

Finalment la incertesa de la calor específica és:

$$\delta U_{C_p} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial C_p}{\partial T} \cdot \delta T \right)^2} = \pm \left(\frac{B''}{10^3} + \frac{2 \cdot C'' \cdot T}{10^6} + \frac{3 \cdot D'' \cdot T^2}{10^9} - \frac{2 \cdot E'' \cdot 10^6}{T^3} \right) \cdot \delta T \quad (6.15)$$

- La potència calorífica generada en el venturi, calculada amb l'equació (3.7), depèn de la temperatura del dipòsit D100 (T_1) i la temperatura del dipòsit D200 (T_2). S'ha de tenir en compte que la calor específica es calcula a partir de la temperatura del primer dipòsit (T_1).
 - La derivada parcial de la potència calorífica respecte a la temperatura de D200:

$$\frac{\partial \dot{q}}{\partial T_2} = -m \cdot C_p(T_1) \quad (6.16)$$

- La derivada parcial de la potència calorífica respecte a la temperatura de

D100:

$$\frac{\partial \dot{q}}{\partial T_1} = m \cdot \left(A'' + \frac{B'' T_1}{500} + \frac{3C'' T_1^2}{10^6} + \frac{4D'' T_1^3}{10^9} - \frac{E'' \cdot 10^6}{T_1^2} \right) \quad (6.17)$$

Finalment, agrupant les equacions (6.16) i (6.17) s'obté la incertesa de la potència calorífica:

$$\delta U_{\dot{q}} = \sqrt{\left(-m \cdot C_p(T_1) \right) \cdot \delta T_2 + \left(m \cdot \left(A'' + \frac{B'' T_1}{500} + \frac{3C'' T_1^2}{10^6} + \frac{4D'' T_1^3}{10^9} - \frac{E'' \cdot 10^6}{T_1^2} \right) \right) \cdot \delta T_1} \quad (6.18)$$

En resum, a la Taula 6.1 es mostren les equacions que s'han implementat per cada variable derivada i la seva incertesa.

Variable	Expressió	Incertesa
Densitat [kg/m³]	$\rho = \frac{A}{B^{1+(1-\frac{T}{C})^D}}$	$\delta U_{\rho} = \pm \frac{A \cdot B^{-1-(1-\frac{T}{C})^D} \cdot \ln(B) \cdot D \cdot \left(1 - \frac{T}{C}\right)^{D-1}}{C} \cdot \delta T$
Pressió saturació [kPa]	$P_{sat} = A' \cdot e^{\left[\left(B' - \frac{T}{C'}\right) \cdot \left(\frac{T}{D' + T}\right)\right]}$	$\delta U_{P_{sat}} = \pm \frac{A' \cdot (T^2 + 2D'T - B'C'D') \cdot e^{\left(\frac{T \cdot (B' - \frac{T}{C'})}{T + D'}\right)}}{C' \cdot (T + D')^2} \cdot \delta T$
Nombre de cavitació	$\sigma = \frac{P_{in} - P_{sat}}{\frac{1}{2} \rho v_{in}^2}$	$\delta U_{\sigma} = \pm \sqrt{\left(\frac{2}{\rho \cdot v_{in}^2} \cdot \delta P_{in}\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \delta T\right)^2 + \left(-4 \cdot A_{in}^2 \cdot \frac{P_{in} - P_{sat}}{\rho \cdot Q^3} \cdot \delta Q\right)^2}$
Potència hidràulica [W]	$N_{hidràulica} = Q \left[\Delta P + \rho g \left(\Delta h + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right) \right]$	$\delta U_{N_{hidràulica}} = \pm \sqrt{-Q \cdot \delta P_1 + Q \cdot \delta P_2 + \left(\Delta P + \rho g \Delta h + \frac{3Q^2 \rho}{2} \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \right) \cdot \delta Q}$
Calor específic [kJ/kg·K]	$C_p = A'' + \frac{B'' T}{10^3} + \frac{C'' T^2}{10^6} + \frac{D'' T^3}{10^9} + \frac{E'' \cdot 10^6}{T^2}$	$\delta U_{C_p} = \pm \left(\frac{B''}{10^3} + \frac{2 \cdot C'' \cdot T}{10^6} + \frac{3 \cdot D'' \cdot T^2}{10^9} - \frac{2 \cdot E'' \cdot 10^6}{T^3} \right) \cdot \delta T$
Potència calorífica [W]	$\dot{q} = m \cdot C_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}$	$\delta U_{\dot{q}} = \pm \sqrt{\left(-m \cdot C_p(T_1) \right) \cdot \delta T_2 + m \cdot \left(A'' + \frac{B'' T_1}{500} + \frac{3C'' T_1^2}{10^6} + \frac{4D'' T_1^3}{10^9} - \frac{E'' \cdot 10^6}{T_1^2} \right) \cdot \delta T_1}$

Taula 6.1. Expressions pel càlcul de les variables derivades i la seva incertesa associada

6.3. Xifres significatives d'una mesura

És important tenir en compte el nombre de xifres significatives amb les que s'expressa una

mesura, ja que aquestes proporcionen informació de la seva precisió.

Una vegada calculada la incertesa final de cada mesura, s'ha d'arrodonir aquesta a una sola xifra significativa. Després, depenent de l'ordre de magnitud d'aquesta xifra, es mostraran més o menys dígits de la mesura, sempre respectant que l'ordre de magnitud entre la incertesa i la xifra menys significativa de la mesura coincideixi.

Per exemple, en el cas que el resultat del càlcul de la incertesa del sensor de pressió PT100 sigui 0,748 kPa, s'arrodoneix a 0,7 kPa. D'aquesta manera, la mesura del sensor de pressió obtinguda s'ha d'arrodonir i presentar com a màxim una xifra decimal. Si s'obté un valor de pressió de 98,416 kPa, el resultat final que es mostrarà serà $98,4 \pm 0,7 \text{ kPa}$.

En el cas que la incertesa sigui 7,48 kPa, s'arrodoniria a 7 kPa i el valor de pressió mostrat per un valor de pressió de 98,416 kPa seria $98 \pm 7 \text{ kPa}$.

7. Interfície gràfica LabVIEW

Per tal de programar l'adquisició i l'enregistrament de les dades es fa servir el programari personalitzat de National Instruments, LabVIEW. Aquest ofereix un entorn de programació i desenvolupament gràfic que ajuda a visualitzar cada aspecte de l'aplicació, incloent la configuració del hardware. En aquest llenguatge de programació, el programador connecta diferents nodes, que són funcions, mitjançant cables.

LabVIEW facilita la integració del hardware de mesura de qualsevol proveïdor (Endress&Hauser, ABB, WIKA,...) i permet dissenyar interfícies personalitzades per a l'usuari i desenvolupar algoritmes d'adquisició de dades, de control d'instruments i d'anàlisi de dades.

Els programes de LabVIEW tenen l'extensió ".vi", que és una abreviatura de "Virtual Instrument". Cada instrument virtual està format per tres parts: el diagrama de blocs, el panell frontal i el panell de connexions. El diagrama de blocs és on es realitza tota la programació de l'instrument virtual, connectant cables entre funcions i tenint en compte el flux de dades propi de LabVIEW. El panell frontal, en canvi, és la interfície gràfica amb l'usuari, on es veuen tots els resultats i es treballa mentre s'executa el programa. Finalment, el panell de connexions es fa servir per controlar les entrades i sortides d'un instrument virtual.

En el sistema d'adquisició de dades, la funcionalitat del programa realitzat en LabVIEW es pot dividir en tres grups:

1. Mostrar les dades extretes del sistema de mesura en temps real, per tal que es puguin ajustar les condicions de treball del sistema abans de començar a enregistrar dades.
2. Enregistrar les mesures de les magnituds físiques en "brut", és a dir, tal com arriben dels sensors, en mA. D'aquesta manera, en el cas que hi hagués algun error en la conversió de les dades, sempre es disposarà d'un fitxer de reserva amb les dades extretes directament dels sensors, sense fer cap conversió.
3. Convertir les dades en "brut" a un Excel, on es mostren les variables primàries en sistema internacional (SI) i les variables derivades, amb la incertesa associada de cada mesura.

Per extreure les dades del mòdul de *National Instruments* es fa servir un controlador anomenat NI-DAQmx, que s'ha d'instal·lar a l'ordinador que es faci servir pel sistema d'adquisició de dades. A la Figura 7.1 es mostra la paleta de funcions que incorpora aquest controlador NI-DAQmx, entre les quals es troba el *DAQ Assistant*, una guia per configurar,

validar i adquirir dades de manera gràfica i interactiva.

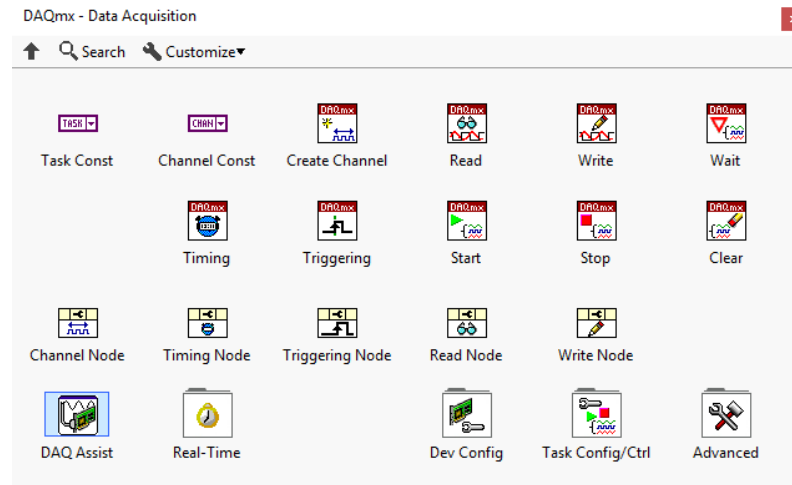


Figura 7.1. Paleta de funcions del DAQmx en LabVIEW.

En el *DAQ Assistant* es configura que a través del mòdul es vol obtenir una entrada de corrent analògica, i s'indica quina entrada del mòdul correspon a cada sensor.

Connectant el sensor PT100 en el terminal "ai0" del mòdul d'adquisició i, seguint l'ordre de connexions del mòdul, s'introdueixen aquests paràmetres en el *DAQ Assistant* per tal d'assignar la mesura de corrent que s'introdueix en cada canal a un sensor, com es mostra a la Figura 7.2. També podem observar que el *DAQ Assistant* ha identificat el tipus de mòdul que es fa servir (NI-9208) i el xassís al que està connectat (cDAQ9185).

Channel Settings

	Order	Physical Channel	Device Type
PT100	0	cDAQ9185-1CDC1ABMod1/ai0	NI 9208
PT400	1	cDAQ9185-1CDC1ABMod1/ai1	NI 9208
PT401	2	cDAQ9185-1CDC1ABMod1/ai2	NI 9208
PT200	3	cDAQ9185-1CDC1ABMod1/ai3	NI 9208
PT302	4	cDAQ9185-1CDC1ABMod1/ai4	NI 9208
PT301	5	cDAQ9185-1CDC1ABMod1/ai5	NI 9208
PT300	6	cDAQ9185-1CDC1ABMod1/ai6	NI 9208
TT100	7	cDAQ9185-1CDC1ABMod1/ai7	NI 9208
TT200	8	cDAQ9185-1CDC1ABMod1/ai8	NI 9208
FIT400	9	cDAQ9185-1CDC1ABMod1/ai9	NI 9208
VFD400	10	cDAQ9185-1CDC1ABMod1/ai10	NI 9208

Figura 7.2. Configuració dels canals d'entrada en el DAQ Assistant.

Finalment, aquest *DAQ Assistant* també permet variar la freqüència de mostreig a la que el

mòdul treballa. Aquest paràmetre pot resultar de gran utilitat en el cas que en algun experiment es vulguin obtenir més mostres per segon, sempre respectant els límits que marquen els sensors.

Una vegada configurat el *DAQ Assistant*, aquest retorna un conjunt de dades del tipus dinàmic, representades en LabVIEW amb un cable de color blau amb ratlles blanques. Per tal de poder treballar amb aquestes dades és necessari fer la conversió del tipus de dades dinàmiques a un *array 2D*, el qual es pot entendre com una matriu en què cada fila correspon a un canal diferent.

Sabent quina fila de dades correspon a cada sensor, es pot separar cada una d'aquestes amb la funció "Index Array" de LabVIEW i tractar per separat les mesures de cada sensor.

A la Figura 7.3 es pot veure com, a partir d'una freqüència d'adquisició que introdueix l'usuari en el *DAQ Assistant*, aquest retorna el conjunt de dades dinàmiques, les quals es converteixen a *array 2D* i es separen per files, ja que cada fila correspon a les dades d'un sensor diferent.

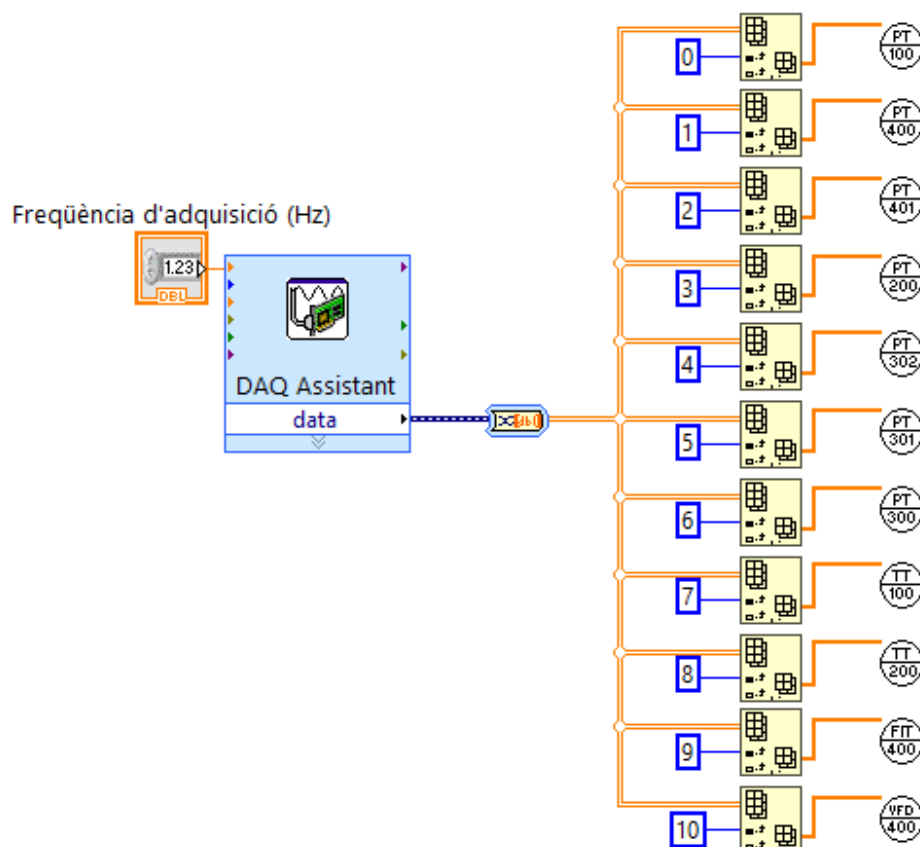


Figura 7.3. *DAQ Assistant implementat al LabVIEW.*

Els valors en "brut" que s'obtenen del mòdul s'introdueixen en un instrument virtual,

personalitzat per a cada sensor present en el sistema d'adquisició de dades i amb la icona corresponent a la seva nomenclatura.

Aquest instrument virtual de cada sensor converteix la mesura a unitats del SI i fa la mitja dels 5 últims valors que s'han mostregjat, per tal de suavitzar el senyal mitjançant un filtratge per software. A partir de les 3 incerteses presents en la cadena d'adquisició (incertesa aleatòria, incertesa sistemàtica i incertesa del mòdul) es calcula la incertesa que presenta la mesura d'aquell sensor.

Adicionalment, aquest instrument virtual també retorna informació referent al fabricant, tipus i número de sèrie del sensor, així com el tipus de transducció que fa.

A la *Figura 7.4* podem observar l'instrument virtual personalitzat pel sensor PT100, en el qual es retorna el valor actual de la mesura (kPa), la seva incertesa associada (kPa) i un *clúster*, on es mostra tota la informació referent al sensor.

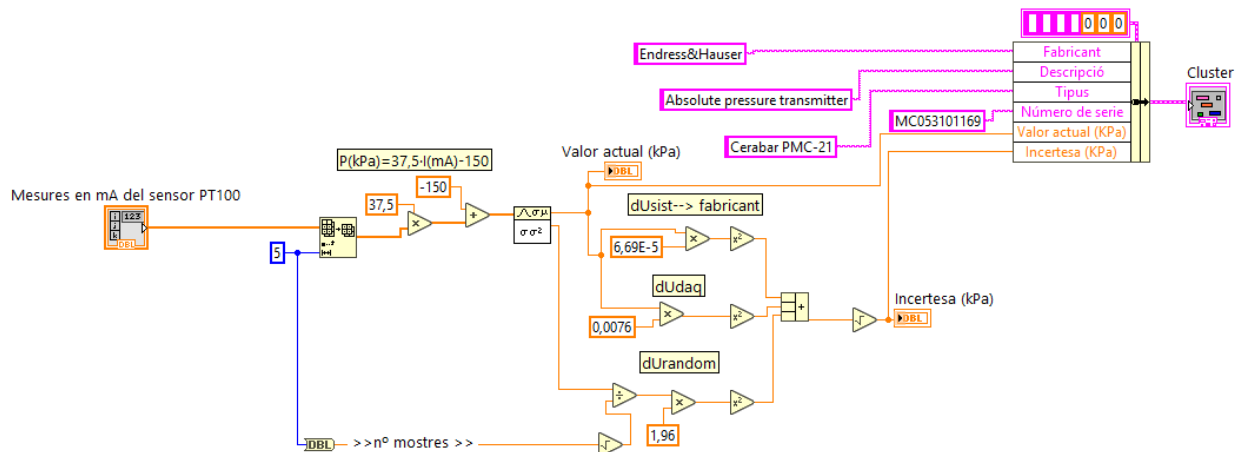


Figura 7.4. Instrument Virtual del sensor PT100.

Per tal de visualitzar al panell frontal la mesura corresponent a cada sensor i la seva incertesa, s'ha creat un altre instrument virtual anomenat "String representation.vi" en què, a partir d'una mesura, la seva incertesa associada i les unitats amb les que s'expressa, crea una sortida amb tots aquests valors concatenats. Per la representació d'aquest valor es té en compte el nombre de xifres significatives que té la mesura, el qual depèn de la incertesa associada a aquesta.

A la *Figura 7.5* podem observar el panell frontal d'aquest instrument virtual, el qual arrodoneix la incertesa a una xifra significativa i també arrodoneix la mesura per tal que concordi amb l'ordre de magnitud de la incertesa.

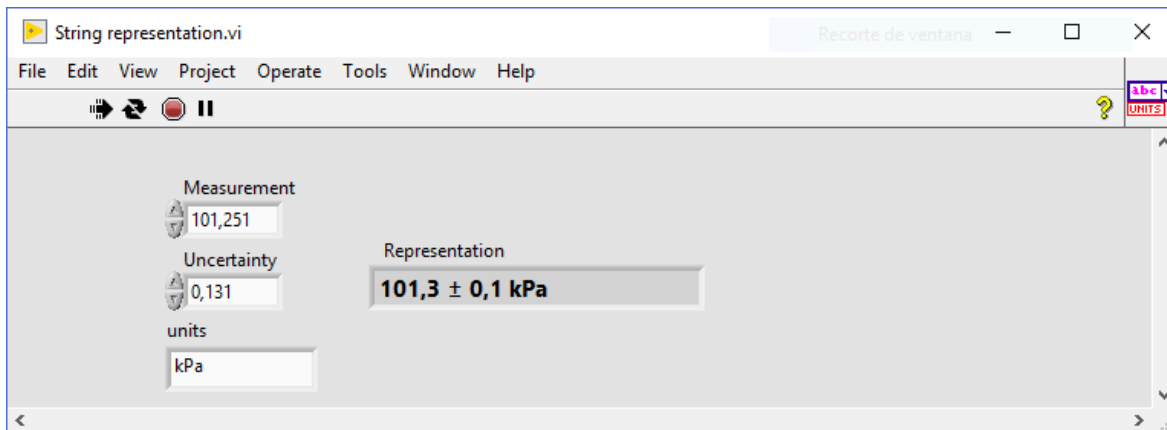


Figura 7.5. Panell frontal de la representació d'una mesura amb la seva incertesa associada.

Seguidament, s'implementa l'equació de totes les variables derivades en un altre instrument virtual, el qual necessita que s'introdueixi com a entrada la mesura primària corresponent i retorna com a sortida el valor de la variable derivada en SI.

Per a cada variable derivada també es calcula i es mostra la seva incertesa, tenint en compte la propagació de la incertesa que es produeix en calcular-les. A la Figura 7.6 es mostra l'exemple de la implementació de l'equació (3.2) pel càlcul de la pressió de saturació (P_{sat}), on s'introdueix la temperatura en °C i s'obté la pressió en kPa.

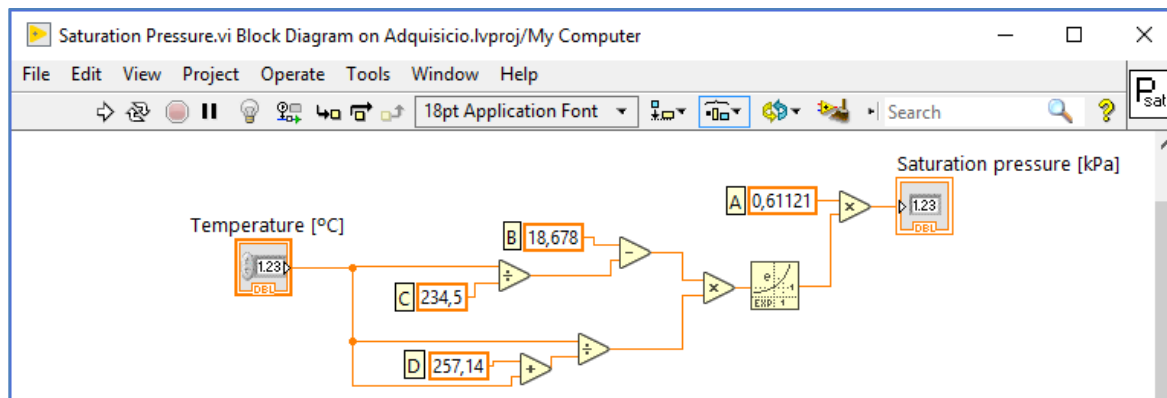


Figura 7.6. Implementació de l'equació (3.2) de la pressió de saturació al LabVIEW.

L'instrument virtual de la pressió de saturació s'introdueix en el diagrama de blocs, tal com s'observa a la Figura 7.7, connectant la temperatura TT100 com a variable primària d'entrada i retornant el valor de la pressió de saturació en kPa.

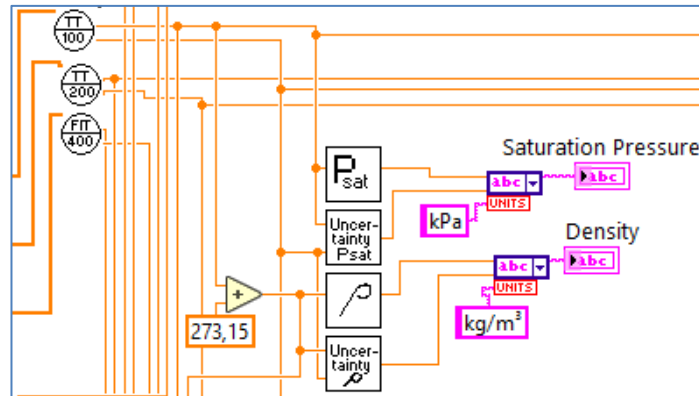


Figura 7.7. Exemple del càlcul de la pressió de saturació i la densitat en LabVIEW.

A la Figura 7.8 es mostra la interfície gràfica del LabVIEW, on s'observen totes les mesures dels sensors, amb la seva incertesa associada i amb les xifres significatives corresponents. Addicionalment, a la part dreta es pot seleccionar quin sensor es vol monitoritzar en detall, per tal de veure la seva informació tècnica i la seva tendència al llarg del temps.

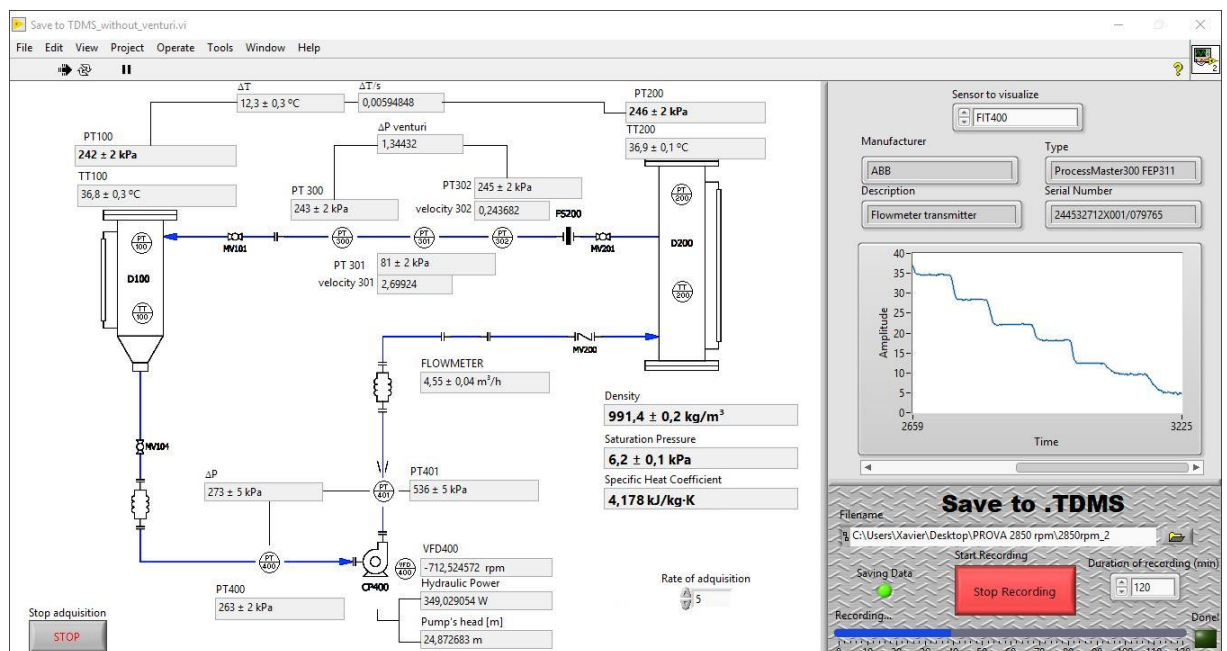


Figura 7.8. Interfície gràfica de LabVIEW.

Per tal que l'usuari pugui començar a enregistrar dades en el moment que ha assolit el punt de treball desitjat, hi ha una part al costat inferior dret on es pot iniciar l'enregistrament de dades.

Una vegada iniciat l'enregistrament de dades, aquest es pot parar de dues maneres: establint un temps de gravació màxim, el qual es veu com va evolucionant en una barra blava a la part inferior, o bé parant la gravació en el moment desitjat clicant al botó vermell

“Stop Recording”.

El fitxer en què es guarden les dades en brut té un format *.tdms*. Aquest és un tipus especial de format binari creat per National Instruments, que conté dos fitxers per separat: un fitxer binari amb totes les dades i propietats d'aquestes, i un fitxer d'índex binari que proporciona informació de tots els atributs i indicacions del fitxer binari. En comparació amb altres formats amb els que treballa LabVIEW, el TDMS és el que ocupa menys espai en el disc, presenta una alta velocitat d'escriptura i de llegida i conté informació inherents als atributs dels senyals.

Per guardar les dades en aquest format es fa servir l'Express VI anomenada “Write to Measurement File”, la qual permet configurar la informació present en el fitxer de sortida, igual que el seu format. Aquest instrument virtual presenta una entrada anomenada “Enable” que permet activar i desactivar l'enregistrament de dades. Per controlar-ho manualment es situa un botó en el panell frontal anomenat “Start Recording”. Una vegada a començat a enregistrar aquest botó es passa a dir “Stop Recording” i correspon a la parada manual de l'enregistrament.

Finalment, se li atribueix a cada mesura la data i hora absoluta en què han estat mostrejades, amb 3 decimals de precisió en els segons (com per exemple 05/15/2018 19:23:15,001), mitjançant l'Express VI “Set Dynamic Data Attributes”, com es mostra a la Figura 7.9.

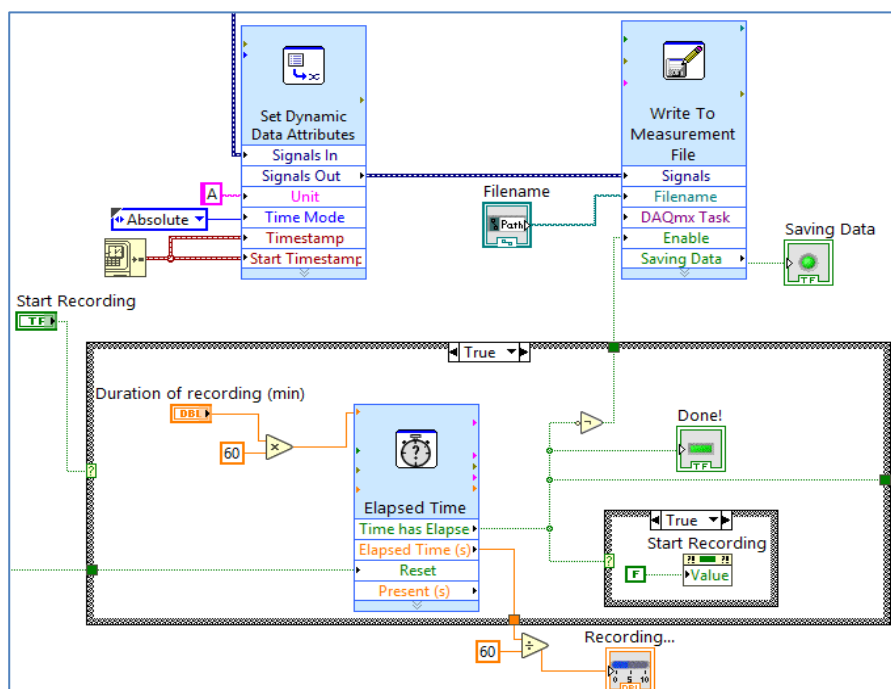


Figura 7.9. Blocs que permeten enregistrar les dades en un fitxer TDMS.

Una vegada enregistrades les dades en un fitxer TDMS, es fa la conversió a Excel (.xlsx) per facilitar l'estudi científic posterior. Per poder crear i modificar un arxiu d'Excel s'utilitza l'extensió de LabVIEW anomenada "Report Generation Toolkit".

La informació mostrada en l'arxiu d'Excel es separa en 3 fulles diferents:

- A la primera fulla d'Excel es mostra la informació referent als sensors i al material utilitzat en aquell experiment. S'etiqueta amb el nom de "Information".
- A la segona fulla d'Excel, en canvi, es mostren les dades en brut de cada sensor utilitzat, juntament amb la data absoluta en què han estat mostrejades. S'etiqueta amb el nom de "Primary Measurements".
- A la tercera fulla d'Excel es mostren les dades convertides al sistema internacional i la seva incertesa associada. També es mostra el valor de les variables derivades per cada instant de temps, amb la seva corresponent incertesa. S'etiqueta amb el nom de "Derivated Measurements".

A la *Figura 7.10* s'observa un exemple del fitxer Excel obtingut. A l'esquerra de la imatge es veuen les dades obtingudes en brut, i a la dreta, en canvi, es mostren les mesures en SI i la seva incertesa. Cal remarcar que cada mesura té una data i una hora associades. Tot i així, donat que, en fer la conversió i el càlcul de les variables derivades, es fa la mitja de 5 valors (un filtratge per software), se li atribueix el temps d'adquisició d'aquesta mesura mitjana al temps de la primera mostra de les cinc.

	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E	F
1		PT100 (mA)	PT400 (mA)	PT401 (mA)	PT200 (mA)	1		PT100(kPa)	dU PT100	PT200 (kPa)	dU PT200	PT400 (kPa)
2	06/08/2018 11:31:00,634	6.712748	7.237324	7.15784	6.709223	2	06/08/2018 11:31:00,634	101.766691	0.774075	101.584708	0.772411	121.408432
3	06/08/2018 11:31:01,834	6.712748	7.237324	7.15784	6.709223	3	06/08/2018 11:31:01,634	101.720507	0.773109	101.577824	0.772537	121.371984
4	06/08/2018 11:31:01,034	6.714466	7.237714	7.157256	6.708727	4	06/08/2018 11:31:02,634	101.789999	0.775156	101.581974	0.772456	121.387051
5	06/08/2018 11:31:01,234	6.714466	7.237714	7.157256	6.708727	5	06/08/2018 11:31:03,634	101.747139	0.773361	101.576978	0.772449	121.371079
6	06/08/2018 11:31:01,434	6.714466	7.237714	7.157256	6.708727	6	06/08/2018 11:31:04,634	101.777509	0.775646	101.609767	0.772551	121.37698
7	06/08/2018 11:31:01,634	6.712499	7.237166	7.159238	6.708323	7	06/08/2018 11:31:05,634	101.767005	0.77405	101.56612	0.772554	121.397869
8	06/08/2018 11:31:01,834	6.712499	7.237166	7.159238	6.708323	8	06/08/2018 11:31:06,634	101.718205	0.774308	101.573339	0.772793	121.330068
9	06/08/2018 11:31:02,034	6.712499	7.237166	7.159238	6.708323	9	06/08/2018 11:31:07,634	101.748005	0.773398	101.567202	0.772279	121.353967
10	06/08/2018 11:31:02,234	6.712619	7.235716	7.158016	6.70937	10	06/08/2018 11:31:08,634	101.718087	0.773268	101.561341	0.772225	121.401547
11	06/08/2018 11:31:02,434	6.712619	7.235716	7.158016	6.70937	11	06/08/2018 11:31:09,634	101.702037	0.773088	101.527863	0.772089	121.372417
12	06/08/2018 11:31:02,634	6.712619	7.235716	7.158016	6.70937	12	06/08/2018 11:31:10,634	101.715039	0.774959	101.532682	0.771965	121.479832
13	06/08/2018 11:31:02,834	6.715475	7.237578	7.156833	6.708557	13	06/08/2018 11:31:11,634	101.720959	0.774937	101.555971	0.77224	121.312503
14	06/08/2018 11:31:03,034	6.715475	7.237578	7.156833	6.708557	14	06/08/2018 11:31:12,634	101.766592	0.782412	101.572828	0.772381	121.461638
15	06/08/2018 11:31:03,234	6.715475	7.237578	7.156833	6.708557	15	06/08/2018 11:31:13,634	101.712855	0.773591	101.548143	0.772099	121.254852
16	06/08/2018 11:31:03,434	6.712955	7.23649	7.158667	6.709223	16	06/08/2018 11:31:14,634	101.678709	0.775865	101.555086	0.772189	121.269112
17	06/08/2018 11:31:03,634	6.712955	7.23649	7.158667	6.709223	17	06/08/2018 11:31:15,634	101.75125	0.773665	101.584925	0.77244	121.218404
18	06/08/2018 11:31:03,834	6.712955	7.23649	7.158667	6.709223	18	06/08/2018 11:31:16,634	101.639508	0.772585	101.605046	0.772531	121.330717
19	06/08/2018 11:31:04,034	6.713458	7.23661	7.157326	6.708384	19	06/08/2018 11:31:17,634	101.853669	0.786523	101.587678	0.772821	121.328554
20	06/08/2018 11:31:04,234	6.713458	7.23661	7.157326	6.708384	20	06/08/2018 11:31:18,634	101.750837	0.774121	101.54529	0.772099	121.32043
21	06/08/2018 11:31:04,434	6.713458	7.23661	7.157326	6.708384	21	06/08/2018 11:31:19,634	101.714783	0.785611	101.615216	0.772746	121.435064
22	06/08/2018 11:31:04,634	6.715336	7.236757	7.158756	6.709608	22	06/08/2018 11:31:20,634	101.719366	0.778077	101.584492	0.772875	121.213684
23	06/08/2018 11:31:04,834	6.715336	7.236757	7.158756	6.709608	23	06/08/2018 11:31:21,634	101.828512	0.775577	101.569759	0.77262	121.464431
24	06/08/2018 11:31:05,034	6.715336	7.236757	7.158756	6.709608	24	06/08/2018 11:31:22,634	101.717045	0.776055	101.598811	0.772793	121.87281
25	06/08/2018 11:31:05,234	6.712163	7.236663	7.15627	6.709572	25	06/08/2018 11:31:23,634	101.878492	0.78646	101.540471	0.772352	121.584907

Figura 7.10. Excel generat a partir d'un TDMS extret del sistema d'adquisició de dades.

Encara que el separador decimal en LabVIEW és la coma, s'ha fet servir un punt com a separador decimal en l'Excel per evitar errors en la conversió de l'arxiu i facilitar el tractament de dades.

8. Validació del sistema d'adquisició

Per tal de validar el correcte funcionament del sistema d'adquisició de dades s'han realitzat diverses proves amb els sensors sota condicions de treball conegudes, per veure el seu funcionament.

Primerament, es comprova el funcionament de cada sensor de pressió amb un aparell que permet controlar la pressió que subministra. Després de deixar-lo establir a pressió atmosfèrica, es sotmet el sensor a una pressió de 32 kPa, seguidament d'una pressió de 10 kPa i d'una de 50 kPa. Per cada sensor s'obté una gràfica com la que es mostra a la Figura 8.1, en què es comprova el seu correcte funcionament.

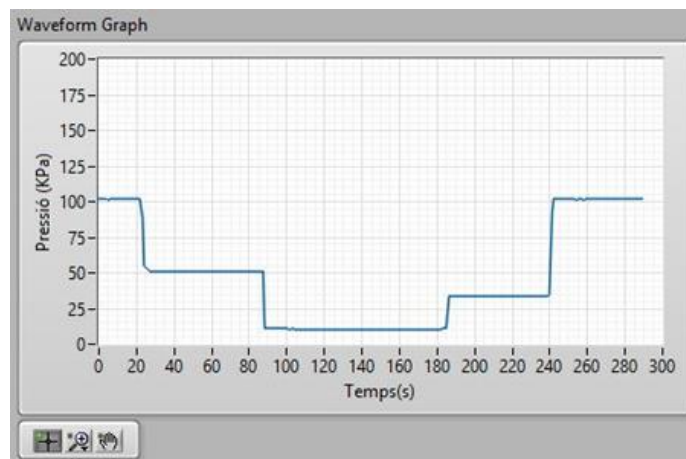


Figura 8.1. Validació del funcionament del sensor PT200.

Pel sensor de temperatura es realitza el mateix tipus d'anàlisi, però comparant la temperatura mesurada amb la temperatura ambient i amb la temperatura que mostra un termòmetre.

Per validar el funcionament del cabalímetre i del variador de freqüència es comparen els valor obtinguts en el LabVIEW amb els que es mostren per la pantalla digital que aquests porten incorporada. Degut a la pèrdua d'informació al llarg de la cadena d'adquisició, el valor mostregat no és exactament igual al mostrat per la pantalla, però està inclòs en l'interval que indica la incertesa de la mesura.

Seguidament, un cop muntats tots els sensors al túnel de cavitació, es realitzen una sèrie d'experiments per a comprovar el càlcul de les variables derivades. Un cop extretes les mesures i convertides en un fitxer Excel, es pot comprovar el càlcul de les variables derivades implementant les mateixes funcions a l'Excel. Per tal de validar la veracitat de les mesures extretes, es fa un estudi qualitatiu dels resultats, comparant-los amb els resultats

teòrics.

Un altra tècnica realitzada per validar els resultats és calcular la corba característica de la bomba a una velocitat de 2850 rpm, que representa l'altura a la que la màquina pot impulsar diferents cabals. Posteriorment, es pot comparar la corba obtinguda experimentalment amb la proporcionada pel fabricant.

Per tal de fer-ho, es fixa la velocitat de rotació de la bomba a un 100% de la nominal, és a dir, a 2850 rpm i es modifica el cabal mitjançant una vàlvula de papallona. Tenint en compte la ISO 9906:2012, que especifica com es fan els tests de les bombes rotodinàmiques, es calcula l'altura de la bomba en funció del cabal entre l'entrada (PT400) i la sortida de la bomba (PT401), resultant l'equació (8.1). [16]

$$H_{bomba} = \frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta h + \frac{v_{PT401}^2(Q) - v_{PT400}^2(Q)}{2g} \quad (8.1)$$

on ΔP correspon a la diferència de pressions entre el sensor PT400 i el PT401 (en Pa) i Δh correspon a la diferència d'altura entre els sensors (en m).

A la Figura 8.2 es mostra el posicionament dels sensors aigües amunt i aigües avall de la bomba, així com la diferència d'altura entre aquests (0,28 m).



Figura 8.2. Ubicació dels sensors PT400 i PT401 al túnel de cavitació.

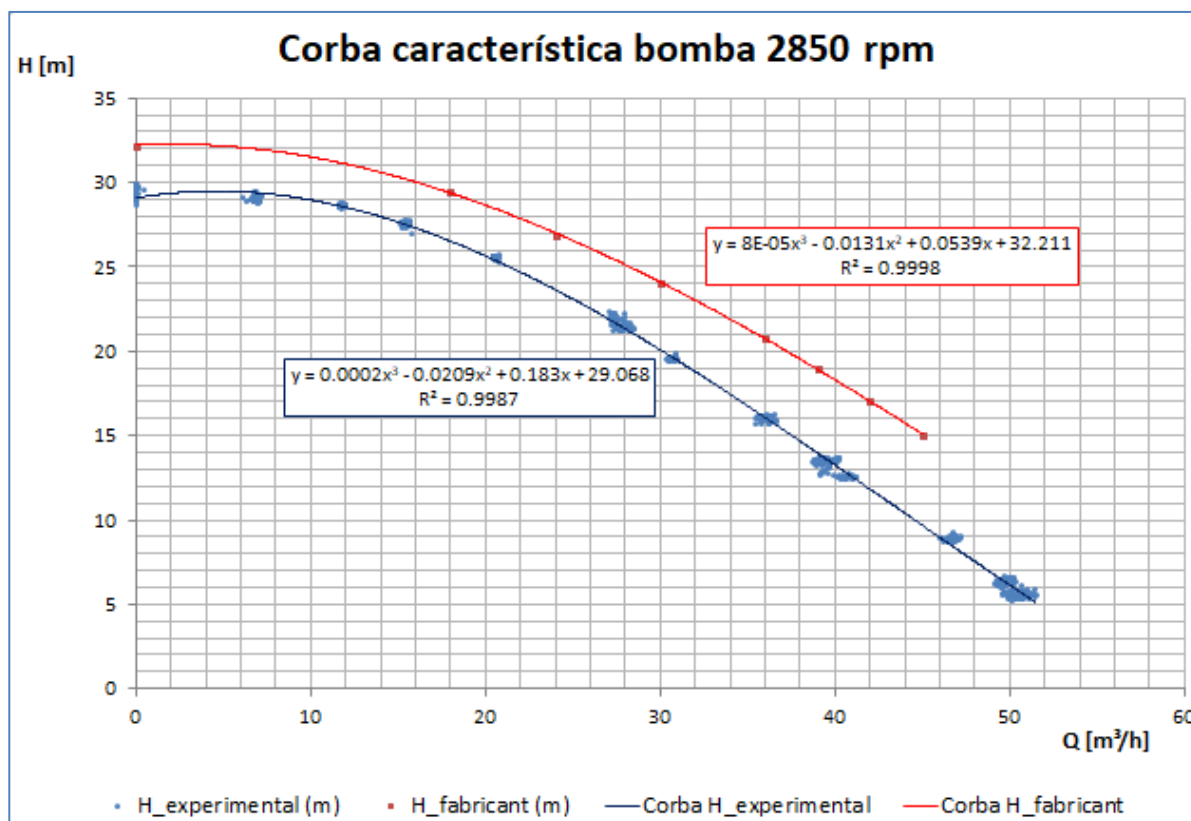
Pel càlcul de la corba experimental és necessari calcular, per cada valor de cabal, l'altura de la bomba mitjançant l'equació (8.1) i, amb el variador de freqüència, forçar que la velocitat

del motor sigui 2850 rpm. Una vegada estabilitzada la velocitat de rotació del motor, i per tal d'obtenir un nombre major de mesures, es realitzen quatre rampes al cabal, dos de pujada i dos de baixada.

A la rampa de pujada es parteix de la vàlvula de papallona totalment tancada (forçant un cabal de 0 m³/h) i es va obrint progressivament fins que s'obra completament (assolint un cabal màxim de 51,5 m³/h). A la rampa de baixada, en canvi, es parteix de la vàlvula reguladora totalment oberta i es va tancant progressivament, per disminuir el cabal de 51,5 m³/h a 0 m³/h.

Seguidament, per a obtenir la corba de l'altura proporcionada pel fabricant, es fan servir els valors d'altura que aquest proporciona per cada cabal a 2850 rpm, indicats al full d'especificacions tècniques. [17]

Finalment, es realitza una regressió polinòmica d'ordre 3 per a obtenir les corbes que aproximen millor els punts obtinguts, i es comparen al *Gràfic 8.1*. Al gràfic es poden observar les equacions de les corbes que aproximen millor els punts experimentals i el seu coeficient R², el qual indica que les aproximacions són bones.



Gràfic 8.1. Comparació entre l'altura de la bomba proporcionada pel fabricant i l'experimental

Comparant les dues corbes s'observa que la diferència entre aquestes no és molt elevada en comparació amb els valors mesurats. Aquesta petita desviació entre les corbes pot ser deguda a la temperatura a la què s'ha realitzat la prova, ja que el fabricant, segons la ISO

9906:2012, l'ha realitzat a 20° C; mentre que la temperatura en el túnel de cavitació ha variat al llarg de l'experiment entre 22,4° i 46° C. Un altra causa que pot haver provocat aquesta desviació entre les corbes és que la bomba SHE 40-160/40 de LOWARA, utilitzada en el túnel de cavitació, no és nova, per tant es pot haver desgastat amb els anys.

Per tant, es pot concloure que la corba característica de la bomba a 2850 rpm s'aproxima bastant a la corba proporcionada pel fabricant, i es valida el sistema d'adquisició de dades a la bomba.

9. Planificació temporal

Per tal de programar adequadament totes les tasques a realitzar en aquest projecte, s'ha realitzat un diagrama de Gantt on es mostra la planificació temporal d'aquestes:

		Distribució temporal (nº setmana de l'any)																
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Estudi previ	Estudi del túnel de cavitació i variables mesurades																	
	Estudi de les especificacions dels sensors utilitzats: sensibilitat, rang de mesura, localització,...																	
	Càlcul de la incertesa de cada mesura																	
	Propagació de la incertesa al llarg de tot el sistema d'adquisició																	
Programació en LabVIEW	Autoaprenentatge de LabVIEW																	
	Adquisició del senyal en brut (mA) de cada transmissor.																	
	Conversió del senyal en brut en unitats del SI per cada mesura																	
	Càlcul i implementació de les variables derivades																	
	Càlcul incertesa variables derivades																	
	Programació de la interfície gràfica amb l'usuari																	
	Emmagatzematge de dades en brut																	
	Conversió del fitxer .TDMS en brut a Excel																	
Validació	Validació del correcte funcionament del sistema d'adquisició de dades																	
Redacció	Redacció memòria escrita																	
	Preparació presentació oral																	

Taula 9.1. Diagrama de Gantt on es mostra la planificació temporal del projecte.

10. Impacte mediambiental

Pel que fa a l'impacte mediambiental del projecte, s'ha de tenir en compte el consum elèctric dels sensors i de l'ordinador que serveix per adquirir i processar totes les dades provinents d'aquests. Per generar aquesta electricitat és necessari utilitzar alguna tècnica d'obtenció d'energia, ja sigui renovable o no renovable. Depenent del tipus de tècnica utilitzada s'emetrà més o menys CO_2 a l'atmosfera, per això es considera el factor de conversió indicat pel Ministeri d'Energia de $331 \text{ g CO}_2/\text{kWh}$. [18]

La font de tensió que alimenta els sensors consumeix 230V entre la fase i el neutre, pels quals circulen 2,23 A amb un factor de potència de 0,51. Tenint això en compte podem concloure que consumeix 261,8 W/h quan subministra una tensió contínua als sensors de 24 V. Considerant que l'estudi científic es fa durant un any, en el que es treballa 5 hores al dia els 5 dies laborals de la setmana, el consum ascendeix a 314,16 kWh/any. Aquest consum es equivalent a una emissió de 103,99 kg de CO_2 per any.

Per tal que l'aigua estigui en moviment dins el túnel de cavitació, també és necessari alimentar el motor trifàsic de gàbia d'esquirol que impulsa la bomba, el qual consumeix 3 kW de potència nominal. Donat que per fer l'estudi s'anirà variant la seva velocitat de rotació, també variarà la potència consumida des de 0, quan estigui totalment parat, a 3 kW, quan vagi a la velocitat de rotació màxima. Per tant, es calcula que aproximadament el seu consum serà de 1,5 kW/hora, el qual, tenint en compte que treballarà 5 hores al dia durant els 5 dies laborals de la setmana, consumeix 1,8 MW/any. Aquest consum equival a una emissió de 595,8 kg de CO_2 a l'any.

Depenent de l'ordinador que es connecti al sistema d'adquisició, el consum pot oscil·lar entre 50 i 100 W/hora. En concret, l'ordinador utilitzat en aquest treball, que és un ASUS A555L, consumeix 65 W/hora. Si tenim en compte que l'ordinador estarà encès unes 5 hores al dia durant 5 dies laborals a la setmana, el consum elèctric anual seria 78 kWh/any. Aquest consum és equivalent a una emissió de 25,82 kg de CO_2 per any.

Per il·luminar el recinte es considera que es fan servir bombetes de baix consum, de 20 W. Considerant que es treballa 5 hores al dia durant 240 dies a l'any, el seu consum anual ascendeix a 24 kWh, corresponent a 7,94 kg de CO_2 per any.

Per tant, l'emissió de CO₂ degut al consum elèctric es mostra a la Taula 10.1:

Aparell	Consum elèctric anual	Emissió de CO₂ anual
Sistema adquisició	314,16 kWh/any	103,99 kg CO ₂ /any
Motor de la bomba	1800 kWh/any	595,8 kg CO ₂ /any
Ordinador	78 kWh/any	25,82 kg CO ₂ /any
Sistema d'il·luminació	24 kWh/any	7,94 kg CO ₂ /any
Total	2216,16 kWh/any	733,55 kg CO₂/any

Taula 10.1. Consum elèctric i emissions de CO₂ anuals per cada aparell electrònic.

D'altra banda, per fer l'estudi científic en el que s'implementen els sensors és necessari introduir aigua en el túnel de cavitació, que té una capacitat d'uns 80 litres d'aigua. Tot i així, degut que no hi ha cap procés de contaminació de l'aigua en fer-la circular pel túnel de cavitació, una vegada acabat l'estudi es pot abocar l'aigua residual al sistema de clavegueram convencional, per tant es compleixen tots els requisits d'abocaments d'efluents industrials. [19]

Finalment, s'ha de tenir en compte que, una vegada acabada la vida útil del sistema d'adquisició de dades, els sensors i aparells electrònics es converteixen en un residu d'aparell electrònic i elèctric (RAEE). Aquests residus no poden ser llançats al contenidor convencional, sinó que segons el Reial Decret 110/2015 s'han de sotmetre a recollida selectiva. Una vegada recollits, aquests RAEE són transportats a plantes especials de tractament per tal de reciclar-los, separant els components perillosos i aprofitant alguns materials per fer altres aparells electrònics. [20]

11. Pressupost

Primerament, a la Taula 11.1 es mostra el cost dels sensors que formen part del sistema d'adquisició de dades, juntament amb el nom de l'empresa proveïdora:

Sensor	Proveïdor	Cost
PT100	Endress&Hauser	172,73 €
PT400	Endress&Hauser	172,73 €
PT401	Endress&Hauser	172,73 €
PT200	Endress&Hauser	172,73 €
PT302	Endress&Hauser	172,73 €
PT301	Endress&Hauser	191,74 €
PT300	Endress&Hauser	172,73 €
TT100	WIKA	57,72 €
TT200	WIKA	57,72 €
FIT400	ABB	1.390,90 €
VFD400	DANFOSS	804,5 €
Total (IVA no inclòs)		3.538,96 €

Taula 11.1. Cost dels sensors utilitzats en el Sistema d'adquisició.

El cost dels elements de la cadena d'adquisició de dades és el següent:

Element	Proveïdor	Cost
Mòdul d'entrada NI-9208 amb terminals amb molles	National Instruments	618,84 €
Xassís compactDAQ NI-9185	National Instruments	953,55 €
Font de corrent d'una fase	National Instruments	214,96 €
Cable Ethernet	National Instruments	23,80 €
Cable blindat amb 2 fils	Farnell	16,53 €
<i>Total (IVA no inclòs)</i>		1.827,7 €

Taula 11.2. Cost del sistema d'adquisició de National Instruments.

Donat que la programació es fa en LabVIEW, s'ha de tenir en compte la llicència d'aquest programari, la qual té un període mínim de duració d'un any i costa 3.451 €/any [21].

Degut a la càrrega computacional que té aquest treball, s'inclou l'amortització de l'ordinador, el qual és un ASUS model A555L. Per poder calcular l'amortització d'aquest, s'ha de tenir en compte que per a un ordinador s'estableix un coeficient màxim d'amortització d'un 25% anual. Donat que es va comprar per un preu de 395,00 € al 2016, resulta una amortització de 102,7 €/any [22].

També s'ha de tenir en compte els honoraris de l'enginyer tècnic encarregat de dur a terme aquest projecte, els quals, considerant que el sou de l'enginyer és de 15 €/hora (més IVA) i que es treballen unes 340 hores, sumen un total de 5.100 €.

Els costos indirectes associats amb el material que l'enginyer necessita per realitzar el projecte s'agrupen en el que s'anomenen 'overheads', en anglès. En aquest cost de 'overheads' es tenen en compte l'electricitat, el internet, l'ordinador i els programes que es necessiten per dur a terme el projecte, tal i com es mostra a la *Taula 11.3*.

Overhead	Preu unitari	Unitat	Total
Consum elèctric de l'ordinador	0,125 €/kWh	20,8 kWh	2,6 €
Llum	0,125 €/kWh	6,4 kWh	0,8 €
Connexió a Internet	40 €/mes	4 mesos	160 €
Amortització ordinador	102,70 €/any	4 mesos	34,23 €
Total (IVA no inclòs)			197,63 €

Taula 11.3. Cost d'enginyeria.

Finalment, donat que es tracta d'un pressupost aproximat, s'arrodoneix el valor de cada concepte a la unitat. Agrupant tots els costos del projecte, es realitza una taula resum amb el pressupost total del sistema d'adquisició de dades:

Concepte	Import
Equips i instrumentació	5.366 €
Llicències i software	3.451 €
Enginyeria	5.100 €
'Overheads'	198 €
Suma de costos del sistema d'adquisició	14.115 €
IVA 21 %	2.964 €
Cost total	17.079 €

Taula 11.4. Taula resum de tots els costos del projecte.

Pel que fa al benefici industrial, el sistema d'adquisició de dades permetrà recopilar tot un conjunt de dades amb les què es farà l'estudi científic.

Conclusions

D'aquest treball es desprèn que per a dissenyar i implementar correctament el sistema d'adquisició de dades, s'ha realitzat un estudi previ de les condicions de treball a les que es sotmetran els sensors i s'ha escollit un rang que s'ajusta a aquestes condicions. Posteriorment, s'ha comprovat la incertesa associada que cada sensor té inherent a la mesura i, per tal d'acotar-la, s'han portat a calibrar els sensors més crítics.

En relació a la interfície gràfica programada en LabVIEW, aquesta és capaç de mostrar en temps real totes les variables d'interès que es volen extreure del túnel de cavitació i calcular les variables derivades que depenen d'aquestes. Tenint en compte el muntatge de l'adquisició de dades, també mostra la incertesa que es propaga al llarg de la cadena d'adquisició, des del sensor fins a l'ordinador, així com la incertesa que es produeix en aplicar la fórmula.

Després d'estudiar totes les incerteses que afecten una mesura, es pot concloure que és d'especial interès minimitzar cada una d'elles al màxim. Donat que la incertesa aleatòria depèn del soroll/interferències i la incertesa sistemàtica es pot corregir calibrant els sensors, és interessant escollir un convertidor analògic-digital amb una resolució de bits el més alta possible i tolerància al soroll, per tal de disminuir la incertesa que aquest aporta a la mesura.

Adicionalment, aquest sistema d'adquisició de dades permet a l'usuari encarregat de fer les proves al túnel de cavitació definir paràmetres de l'adquisició de dades, tals com temps total d'adquisició o freqüència d'adquisició. Cal remarcar que no és necessari que l'usuari tingui coneixements de programació en LabVIEW per tal de fer servir aquest sistema d'adquisició, ja que totes les accions que poden realitzar es troben al panell frontal de LabVIEW.

Per enregistrar les dades en un fitxer, per a un posterior tractament d'aquestes, és necessari guardar-les en el format TDMS, ja que d'altra manera el sistema d'adquisició de dades s'alenteix durant l'enregistrament i no és tant òptim. Per solucionar el problema del tractament de les dades amb el format TDMS, s'ha creat un altre instrument virtual que converteix totes les mesures del format TDMS a un Excel, organitzat en diferents fulles.

Degut a que en instal·lar el sistema d'adquisició de dades al túnel les mesures oscil·len, és necessari fer un petit filtratge per software d'aquestes. Aquest filtratge consisteix en fer la mitjana de 5 mostres i convertir aquest valor mitjà a les unitats del sistema internacional corresponents. Tot i així, al fer aquest filtratge apareix el problema que es perd la informació referent a la data i hora de cada mesura. Per a solucionar-ho se li atribueix a la mesura filtrada la data absoluta de la primera mostra de les cinc.

Finalment, s'ha comprovat el correcte funcionament del sistema d'adquisició de dades

calculant la corba característica de la bomba, quan aquesta treballa al 100% de la seva velocitat nominal. Els resultats han mostrat que la corba obtinguda és semblant a la corba proporcionada pel fabricant.

Un cop acabat l'estudi científic amb aigua, es podria estudiar l'afectació de la cavitació en altres líquids conductors elèctrics, per tal de veure el seu comportament i estudiar la generació de calor.

Agraïments

En primer lloc voldria agrair als professors Francesc Xavier Escaler Puigoriol de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB) i al David Bermejo Plana de Condorchem Envitech S.L. que hagin comptat amb mi per a realitzar aquest treball.

Voldria agrair la tasca del professor Francesc Xavier Escaler Puigoriol, com a tutor del treball, ja que amb el seus consells i la seva experiència com a professional m'ha ajudat a estructurar i millorar el treball.

També agrair al David Bermejo Plana, com a tutor del treball a l'empresa, la seva ajuda, supervisió i documentació proporcionada, així com les correccions i comentaris que m'ha fet al llarg del projecte.

També agraeixo el suport moral de la meva família durant l'elaboració del projecte.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] Procés d'assecatge de líquids:
[<https://condorchem.com/en/vacuum-evaporators/> , 10 de març de 2018]
- [2] Informació tècnica del sensor de pressió PMC-21 :
[https://portal.endress.com/wa001/dla/5001041/2232/000/04/TI01133PEN_0517.pdf ,
15 de març de 2018]
- [3] Funcionament dels transductors de temperatura:
[http://en.wika.com/landingpage_temperature_sensor_en_co.WIKA, 17 de març de 2018]
- [4] Informació tècnica del sensor de temperatura TR11-C:
[http://en.wika.com/upload/DS_TE6014_en_co_70825.pdf, 17 de març de 2018]
- [5] Informació tècnica del transmissor T15H:
[https://www.wika.us/upload/DS_TE1501_en_co_70453.pdf, 17 de març de 2018]
- [6] Informació tècnica del cabalímetre electromagnètic d'ABB:
[https://library.e.abb.com/public/f65d6f02c92341cea4b9bcdb30c3e433/DS_WM-EN_Y.pdf, 17 de març de 2018]
- [7] Informació de la rectificació no controlada d'ona completa:
[<https://es.slideshare.net/erickalexandermaldonado/convertidores-acdc>, 12 de maig de 2018]
- [8] Informació tècnica del variador de freqüència de Danfoss:
[<http://files.danfoss.com/download/Drives/MG33AS02.pdf>, 10 de maig de 2018]
- [9] Mòdul NI-9208:
[http://www.ni.com/pdf/manuals/375170b_02.pdf, 19 de març de 2018]
- [10] Modulació Sigma-Delta:
[<http://www.monografias.com/trabajos/sigmadelta/sigmadelta.shtml>, 17 de maig de 2018]
- [11] Connexió elèctrica M12:
[http://www.nakase.com.ar/PDF_Lappgroup/cables_senal_de_datos_unitronic/unitronic]

_bus_de_campo/conectores_4_polos_sensor_actuador/conector_M12_macho_conductor_abierto.pdf, 2 d'abril de 2018]

[12] Informació elèctrica del variador de freqüència de DANFOSS:

[<http://files.danfoss.com/download/Drives/MG33BF02.pdf>, 10 de maig de 2018]

[13] Font de tensió NI PS-16 :

[<http://www.ni.com/pdf/manuals/372912b.pdf>, 23 de març de 2018]

[14] Xassís CompactDAQ NI 9185:

[<http://www.ni.com/pdf/manuals/376610a.pdf>, 23 de març de 2018]

[15] Càlcul incertesa:

[https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf, 20 de març de 2018]

[16] ISO 9906:2012 per la normalització dels tests en bombes centrífugues:

[<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9906:ed-2:v1:en>, 06 de juny de 2018]

[17] Informació tècnica de la bomba utilitzada, model SHE 40/160-30 de LOWARA:

[https://brownbros.com.au/files/Technical_Data/TECHNICAL_Lowara_SH_Series_sh-td-en2.pdf, 06 de juny de 2018]

[18] Emissions de CO₂ degut al consum elèctric:

[http://www.mincotur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Factores_emision_CO2.pdf, 09 de juny de 2018]

[19] Guia orientativa de les condicions de les autoritzacions i dels permisos d'abocament, segons l'Agència Catalana de l'Aigua , del departament de Territori i Sostenibilitat de la Generalitat de Catalunya: [[http://aca-](http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/Tramits/Tramits_gencat/abocaments/guia_orientativa_autoritzacions_abocament.pdf)

[web.gencat.cat/aca/documents/Tramits/Tramits_gencat/abocaments/guia_orientativa_autoritzacions_abocament.pdf](http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/Tramits/Tramits_gencat/abocaments/guia_orientativa_autoritzacions_abocament.pdf), 09 de juny de 2018]

[20] Reciclatge de residus d'aparells elèctrics i electrònics:

[<http://www.ecotic.es/es/246570/Reciclaje.htm>, 09 de juny de 2018]

[21] Llicència LabVIEW:

[<http://www.ni.com/es-es/shop/labview/select-edition.html>, 09 de juny de 2018]

[22] Coeficient màxim d'amortització:

[https://www.agenciatributaria.es/AEAT.internet/Inicio/_Segmentos_/Empresas_y_profesionales/Empresas/Impuesto_sobre_Sociedades/Periodos_impositivos_a_partir_de_1_

1_2015/Base_imponible/Amortizacion/Tabla_de_coeficientes_de_amortizacion_lineal_.shtml, 09 de juny de 2018]

Bibliografia complementària

- Incertesa i error segons National Instruments: [<http://www.ni.com/product-documentation/53090/en/>, <http://www.ni.com/white-paper/4517/en/> , consultat per última vegada el 20 de maig de 2018]
- Tipus d'errors d'instrumentació:
[https://issuu.com/madaseit/docs/instrumentacion_y_calibracion-p2, 20 de març de 2018]
- Protocol HART:
[http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/EngSch-Buses_201_es.pdf, 03 de maig de 2018]
- Transmissors 4-20 mA: [<https://instrumentationtools.com/4-20ma-transmitter-works/>, 11 de maig de 2018]

ANNEX1. CÀLCUL DE LA INCERTESA SISTEMÀTICA PER CADA SENSOR UTILITZAT

1. Incertesa sistemàtica del sensor PMC-21, model MB044B01169:

En el cas del sensor de pressió PMC-21, el fabricant Endress&Hauser proporciona la fitxa d'informació tècnica, on s'indica l'error d'exactitud, el qual és com a màxim el 0,3% de l'abast (cada sensor ha estat validat i proporciona un error d'exactitud diferent). També s'indica l'error de linealitat (engloba l'error d'histèresi) i el de no repetibilitat, ambdós del 0,1% de l'abast.

Pel sensor de pressió PT301 de Endress&Hauser, model Cerabar PMC21, que té número de sèrie MB044B01169, amb un fons d'escala de 200 kPa (com es veu a la Imatge 0.1) l'error d'exactitud és, segons el fabricant, de com a màxim un 0,3%. Tot i així, cada sensor ha sigut calibrat per la pròpia empresa distribuïdora per tal de determinar exactament aquest error. Els errors de linealitat, en canvi, sí que corresponen a un 0,1% de l'abast, és a dir, a un $\pm 0,2$ kPa .



Imatge 0.1. Sensor de pressió PT301.

Coneixent tots aquests valors, es poden encadenar fent l'arrel de la suma de quadrats de la incertesa de cada component (suposant que les incerteses són independents entre elles), de la següent manera:

$$\delta U_{\text{sistemàtica PT301}} = \pm (\% \text{error} \cdot \text{lectura}^2 + 0,2^2 + 0,2^2)^{\frac{1}{2}}$$

2. Incertesa sistemàtica del sensor de pressió PMC-21:

Pel sensor de pressió PT100 (igual que passa amb els sensors PT200, PT400, PT401, PT302 i PT300) de Endress&Hauser, model Cerabar PMC21, que té un número de sèrie MC05310169, amb fons d'escala de 600 kPa (com mostra la Imatge 0.2), els errors de linealitat i repetibilitat són de $\pm 0,6$ kPa.



Imatge 0.2. Sensor de pressió PT100.

Coneixent tots aquests valors, es poden encadenar fent l'arrel de la suma de quadrats de la incertesa de cada component (suposant que les incerteses son independents entre elles), de la següent manera:

$$\delta U_{\text{sistemàtica PT100}} = \pm (\%error \cdot lectura^2 + 0,6^2 + 0,6^2)^{\frac{1}{2}}$$

3. Incertesa sistemàtica del sensor de temperatura TR11-C:

Pel sensor de temperatura TT100 (igual que pel TT200) de WIKA, model TR11-C, la seva incertesa sistemàtica es pot desglossar en dues parts. Una primera part que engloba l'error d'entrada ("input") i el de sortida ("output") que depèn del rang de temperatura que pugui mesurar el TR11-C. En el cas del model TR11-C el sensor té un rang de temperatura de -30° a 250° C, per tant l'error que presenta aquest és de 0,1% el abast, és a dir, $\pm 0,28$ K. Aquest model també presenta un altre tipus d'error associat al potenciòmetre que té incorporat (T15, classe A), el qual representa una tolerància de $\pm (0,15 + 0,002 \cdot T_{\text{mesurada en } ^\circ C})$ K

Coneixent tots aquests valors, es poden encadenar fent l'arrel de la suma de quadrats de la incertesa de cada component (suposant que les incerteses són independents entre elles), de la següent manera:

$$\delta U_{\text{sistemàtica TT100}} = \pm (0,28^2 + (0,15 + 0,002 \cdot T_{\text{e } C})^2)^{\frac{1}{2}}$$

Tot i així, per tal de reduir la incertesa sistemàtica del sensor de temperatura s'ha enviat l'instrument a calibrar i s'ha fet servir la incertesa sistemàtica proporcionada per l'empresa responsable de fer aquest calibratge.

4. Incertesa del model FEP311

El cabalímetre electromagnètic FEP311, subministrat per l'empresa ABB té un processament digital del senyal que permet al transmissor separar el veritable senyal del soroll, per tant, proporciona una sortida d'alta qualitat (especialment en entorns on hi ha vibracions, soroll hidràulic i temperatures fluctuants). Presenta una precisió estàndard de $\pm 0,4\%$ del valor mesurat a més a més d'un $0,02\%$ del valor màxim mesurable ($180 \text{ m}^3/\text{h}$ en el cas d'aquest cabalímetre), aplicable en ambdós sentits del flux. D'aquesta manera podem definir la incertesa sistemàtica màxima del cabalímetre com:

$$\delta U_{\text{sistemàtica FEP311}} = \pm(0,4\% \cdot \text{valor mesurat} + 0,02\% \cdot 180 \text{ m}^3/\text{h})$$

Donat que el cabalímetre FEP311 ha estat calibrat en el banc de proves d'ABB, es pot acotar la incertesa màxima que proporciona ABB com una incertesa que presenta un valor màxim d'error respecte el valor mesurat d'un $\pm 0,22\%$.